



HAL
open science

Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité

Antonio Ludovico Beraldo

► **To cite this version:**

Antonio Ludovico Beraldo. Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1994. Français. NNT : 1994NAN10076 . tel-01748622

HAL Id: tel-01748622

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748622>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE NANCY I
U.F.R. ENSTIB
Laboratoire du Génie des Procédés
G.F.D. Sciences du Bois

THESE

Présentée à
l'Université de Nancy I
pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

en

SCIENCES DU BOIS

par

Antonio Ludovico BERALDO

Master of Sciences
Faculté de Génie Agricole
Campinas-SP-BRÉSIL

Sujet

**Généralisation et optimisation de la fabrication d'un
composite biomasse végétale-ciment à variations
dimensionnelles limitées vis à vis des variations de
l'humidité**

Soutenue publiquement le 20 juin 1994
Devant la Commission d'Examen

Jury

PRESIDENT : M. Xavier DEGLISE
RAPPORTEURS : M. Bernard THIBAUT
M. José CARRE
EXAMINATEURS : M. André ZOULALIAN
(Directeur de recherche)
M. Khosrow GHAVAMI
INVITES : Mlle. Anne BOSSY
M. Yves CROUZET
M. Eric MOUGEL

A Amélia, la "fibre" qui a renforcé ma "matrice" souvent "fragile"

A nos "composites" : Ana Lídia, Ana Luiza et Francisco.

AVANT-PROPOS

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire du Génie des Procédés, sous la direction de Monsieur le Professeur André ZOULALIAN. Je suis très reconnaissant de la manière dont il m'a accepté, il m'a beaucoup aidé à m'intégrer dans son équipe de chercheurs. Je tiens également à le remercier pour sa patience et ses conseils. J'ai apprécié son enthousiasme pour le sujet (les composites bois-ciment). De même, je le remercie pour ses qualités humaines qui ont été fondamentales lorsqu'il m'a fallu surmonter les difficultés initiales lors de mon arrivée en France.

Je remercie Monsieur Bernard THIBAUT, Directeur de Recherches au CNRS (Montpellier) et Monsieur José CARRE, Directeur de Recherches à la Faculté d'Agronomie de Gembloux, d'avoir bien voulu accepter d'être rapporteurs de ce travail.

Je remercie également pour sa présence, Monsieur Yves CROUZET: Responsable de la Bamboueraie de Prafrance, qui a eu l'amabilité de me faire parvenir des échantillons de bambou.

J'apprécie la présence de Monsieur Khosrow GHAVAMI: spécialiste mondialement reconnu pour ses travaux sur l'utilisation du bambou dans la construction.

Je suis très heureux de la présence de Madame Anne BOSSY, représentante du Ministère de l'Agriculture, et responsable du financement de la recherche sur les composites bois-ciment.

Je remercie le Gouvernement Brésilien, et en particulier le CNPq, de m'avoir accordé une bourse d'études, et pour son efficacité à résoudre certains problèmes administratifs.

Je tiens à remercier le personnel des différents organismes ou de laboratoires (INRA-Champenoux; CRPG-Vandoeuvre; ENSTIB-Epinal; Ecole de Mines-Nancy) qui m'ont aidé, à un moment ou à un autre, dans mon travail. Je remercie également:

- M. João CHIMELO (IPT-São Paulo), qui m'a fait parvenir les lames minces de bambou.

- M. Mário R. DE SOUZA, par la gentillesse avec laquelle il m'a communiqué les expériences développées aux USA, sur la carbonatation des composites bois-ciment.

M. Paulo LEAL (Unicamp-Brésil) aura toujours ma plus profonde reconnaissance. C'est grâce à lui que j'ai pu aboutir à mon travail. Je serai toujours reconnaissant des efforts qu'il aura fournis pour me remplacer efficacement au sein de la Faculté de Génie Agricole, ainsi qu'en s'occupant des multiples tâches administratives en mon absence.

A M^{lle} Voichita BUCUR (INRA-Champenoux) ma reconnaissance pour ses sages conseils lors de l'utilisation des techniques non destructives pour évaluer les propriétés mécaniques des composites bois-ciment.

A M. Jean Marie CLAUDE (Laboratoire de Chimie Minérale-Nancy I) ma gratitude pour les analyses effectués en microscopie électronique

Je remercie également les techniciens de laboratoire Messieurs Jean-Michel ESMEZ et François HUBERT qui m'ont secouru lors des montages expérimentaux. A M. HUBERT ma gratitude pour la correction initiale de mon mémoire. Je tiens à le remercier pour sa patience infinie, pour "traduire" en français avec beaucoup de précision mes idées hésitantes.

A Monsieur Nelson MEDEIROS, tous mes remerciements pour la préparation et l'analyse des sucres réalisées par l'HPLC.

A Eric MOUGEL ma reconnaissance infinie. Outre son engagement personnel dans mon travail, sa fidélité (sans faille) fut très importante pour bien supporter ces quatre longues années "d'exil". Nous quitterons la France avec une saveur particulièrement Vosgienne.

A nos amis brésiliens de Vandoeuvre: merci beaucoup pour la solidarité, qui nous a permis de supporter si longtemps l'absence du "soleil". Dorénavant nous connaissons mieux notre pays, avec son peuple "composite", aux qualités si chaleureuses.

Aux membres de ma famille je laisse le soin de juger si je pouvais me permettre de les soumettre à toutes les contraintes qu'elle a vécue!!

A mon fils Francisco... je tiens à le remercier particulièrement pour la rapidité avec laquelle il m'a appris à utiliser l'ordinateur et pour l'exécution des dessins qui illustrent ma thèse.

INTRODUCTION GENERALE	1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES COMPOSITES BIOMASSE-CIMENT....	5
II.1 INTRODUCTION.....	6
II.2 BIOMASSE VEGETALE	8
II.2.1 BOIS	8
II.2.1.1 ANATOMIE DU BOIS.....	9
II.2.1.2 COMPORTEMENT DU BOIS EN PRESENCE DE VARIATIONS DE L'HUMIDITE.....	11
II.2.1.3 BOIS MODIFIES.....	13
II.2.2 BAMBOU	16
II.2.2.1 INTRODUCTION.....	16
II.2.2.2 SYLVICULTURE DU BAMBOU	17
II.2.2.3 ANATOMIE DU BAMBOU	20
II.2.2.4 BAMBOUS UTILISES AU BRESIL.....	22
II.2.2.5 PROPRIETES GENERALES DU BAMBOU	23
II.2.2.5.1 PROPRIETES PHYSIQUES DU BAMBOU.....	25
II.2.2.5.2 CONSTITUTION CHIMIQUE DU BAMBOU	27
II.2.2.5.3 PROPRIETES MECANQUES DU BAMBOU.....	28
II.2.2.5.4 CHOIX DES ESPECES DE BAMBOU.....	33
II.2.2.5.5 BAMBOU TRANSFORME	33
II.3 LA MATRICE CIMENT.....	34
II.3.1 CONSTITUANTS DU CIMENT.....	35
II.3.2 REACTIONS D'HYDRATATION DU CIMENT.....	36
II.3.3 PRISE ET DURCISSEMENT DU CIMENT.....	37
II.3.4 MORTIERS ET BETONS	38
II.3.4.1 CONSTITUANTS DU BETON.....	39
II.3.4.1.1 CIMENT.....	39
II.3.4.1.2 EAU	40
II.3.4.1.3 AGREGATS.....	41
II.3.4.1.4 ADJUVANTS.....	41
II.3.5 PROPRIETES PHYSIQUES DU BETON.....	42
II.3.5.1 MASSE VOLUMIQUE (MV).....	42
II.3.5.2 VARIATIONS DIMENSIONNELLES.....	43
II.3.5.2.1 RETRAIT.....	43
II.3.5.2.2 GONFLEMENT.....	44

II.3.5.2.3	ESSAIS DE VARIATIONS DIMENSIONNELLES	45
II.3.5.2.4	FACTEURS AGISSANT SUR LE RETRAIT ET LE GONFLEMENT DU BETON.....	46
II.3.5.2.5	CURE PAR UNE MISE EN OEUVRE DE CYCLE DE SECHAGE ET D'HUMIDIFICATION.....	49
II.3.6	PROPRIETES MECANQUES DU BETON.....	51
II.3.6.1	ESSAIS DESTRUCTIFS	51
II.3.6.2	ESSAIS NON-DESTRUCTIFS SUR LE BETON.....	53
II.3.7	CARBONATATION DES BETONS.....	58
II.4	COMPOSITES BIOMASSE VEGETALE-CIMENT (CBC).....	65
II.4.1	INTERETS DES CBC.....	66
II.4.2	CARACTERISTIQUES DES CBC	68
II.4.2.1	PROPRIETES DES COMPOSITES BIOMASSE-CIMENT	68
II.4.2.2	COMPATIBILITE CHIMIQUE ENTRE LA BIOMASSE ET LE CIMENT.....	69
II.4.2.3	METHODES POUR L'EVALUATION DE L'INCOMPATIBILITE ENTRE LE BOIS ET LE CIMENT.....	74
II.4.2.4	TRAITEMENTS PERMETTANT D'AMELIORER LA PRISE DU CIMENT	77
II.4.2.5	TRAITEMENTS PERMETTANT DE MODIFIER LES CARACTERISTIQUES DE LA MATRICE CIMENT.....	82
II.4.2.6	VARIATIONS DIMENSIONNELLES DES COMPOSITES BIOMASSE VEGETALE-CIMENT.....	84
II.4.3	OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	86
	PROCEDURE EXPERIMENTALE	89
III.1	INTRODUCTION.....	90
III.2	PRESENTATION DES ESPECES ETUDIEES	90
III.3	PREPARATION DES PARTICULES.....	92
III.3.1	CONDITIONNEMENT DES PARTICULES.....	92
III.3.2	ELIMINATION DES SUBSTANCES INHIBITRICES CONTENUES DANS LE BOIS PAR UN TRAITEMENT A L'EAU.....	96
III.3.3	IMPREGNATIONS DES PARTICULES DE BOIS ET DE BAMBOU	98
III.4	ANALYSE DES EXTRAITS DU BOIS PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE LIQUIDE (HPLC).....	100
III.5	PREPARATION DES COMPOSITES BIOMASSE VEGETALE-CIMENT (CBC)	100
III.6	GRANDEURS MESUREES SUR LES EPROUVETTES.....	103
III.6.1	CARACTERISTIQUES DE LA REACTION D'HYDRATATION.....	103

III.6.2	MESURE DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES DU CBC.....	104
III.6.3	MESURE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES.....	108
III.6.3.1	ESSAIS MECANIQUES DESTRUCTIFS	108
III.6.3.2	ESSAIS MECANIQUES NON DESTRUCTIFS	109
III.7	CARBONATATION DES EPROUVETTES DE CBC.....	111
	RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	112
IV.1	INTRODUCTION.....	113
IV.2	INFLUENCE DE LA BIOMASSE VEGETALE SUR LA PRISE DU CIMENT- MODES DE TRAITEMENT- INFLUENCE SUR LES BIOMASSES ETUDIEES	113
IV.2.1	TRAITEMENTS NATURELS DES PARTICULES.....	114
IV.2.2	TRAITEMENTS PHYSIQUES DES PARTICULES.....	116
IV.2.2.1	INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES.....	117
IV.2.2.2	INFLUENCE DU pH DU MILIEU.....	119
IV.2.3	ETUDE DE L'EAU DE LAVAGE DES PARTICULES DE BAMBOU.....	120
IV.2.3.1	ROLE INHIBITEUR DE L'EAU DE LAVAGE.....	120
IV.2.3.2	ANALYSE DES EAUX DE LAVAGE PAR CHROMATOGRAPHIE LIQUIDE HAUTE PRESSION (HPLC).....	121
IV.2.3.3	INHIBITION DE LA PRISE DU CIMENT PAR LE SACCHAROSE, LE GLUCOSE ET LE FRUCTOSE.....	124
IV.3	OPTIMISATION ET GENERALISATION DU PROTOCOLE DE STABILISATION DES CBC PROPOSE PAR E. MOUGEL.....	130
IV.3.1	OPTIMISATION DE L'ETAPE DE TRAITEMENT DE L'INTERFACE DES PARTICULES DE BIOMASSE.....	130
IV.3.1.1	TRAITEMENT PAR UNE SUSPENSION DE CIMENT.....	131
IV.3.1.2	TRAITEMENT PAR DES POLYMERES DERIVES D'AMIDON.....	132
IV.3.1.3	TRAITEMENT PAR PULVERISATION DE LIQUIDES ORGANIQUES A CHAINE LONGUE.....	133
IV.3.1.4	TRAITEMENT PAR PULVERISATION DE BITUME.....	135
IV.3.2	OPTIMISATION DE L'ETAPE DE TRAITEMENT DE LA MATRICE CIMENT.....	136
IV.3.2.1	AJOUT D'ACCELERATEURS.....	136
IV.3.2.2	AJOUT DE COMPOSES MINERAUX.....	137
IV.3.3	TRAITEMENTS MIXTES- APPLICATION DE LA METHODOLOGIE AUX QUATRE ESPECES VEGETALES ETUDIEES.....	139
IV.3.3.1	MISE AU POINT DU TRAITEMENT MIXTE OPTIMAL.....	139

IV.3.4 EXTENSION DU TRAITEMENT AUX AUTRES ESPECES VEGETALES ETUDIEES	140
IV.3.5 CONCLUSION	142
OPTIMISATION DE LA DUREE DE STABILISATION DES EPROUVETTES	143
V.1 INTRODUCTION	144
V.2 CARBONATATION DE LA CHAUX D'HYDRATATION	145
V.2.1 AJOUT DIRECT DANS LA MATRICE CIMENT DE CALCAIRE	145
V.2.2 CARBONATATION DIRECTE DE LA CHAUX PAR ADDITION DE CARBONATE ET D'HYDROGENOCARBONATE DE SODIUM	146
V.2.3 CARBONATATION DIRECTE DE LA CHAUX PAR ACTION DE L'ANHYDRIDE CARBONIQUE A L'ETAT GAZEUX	147
V.3 RECICATRISATION DE LA MATRICE CIMENT	149
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	153
NOTATIONS	156
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	159
ANNEXES	172
I- COMPORTEMENTS ACOUSTIQUES DU BOIS ET DU BETON	173
II- UTILISATION DU BAMBOU COMME MATERIAU DE CONSTRUCTION	183
III- RESULTATS EXPERIMENTAUX	187
IV- EVALUATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES CBC	199
V- PHOTOGRAPHIES DES CBC	217

RESUME

Les composites biomasse végétale-ciment (dénommé CBC) présentent de nombreux avantages à condition toutefois que leurs variations dimensionnelles vis à vis de l'humidité extérieure restent limitées. Les études antérieures effectuées au laboratoire ont conduit à un protocole de fabrication d'un composite sapin des Vosges-ciment satisfaisant au cahier des charges suivant:

- masse volumique inférieure à 1200 kgm^{-3}
- résistance à l'écrasement supérieure à 4 MPa
- variations dimensionnelles dans les conditions de la norme française pour les bétons légers inférieures à 1 mm/m.

Notre recherche a consisté tout d'abord à une optimisation des quatre étapes du protocole, à savoir:

- l'élimination des substances inhibitrices de la prise du ciment
- le traitement de l'interface des particules de biomasse végétale
- l'ajout de substances minérales et/ou de certains additifs à la matrice ciment
- la cure des éprouvettes à l'issue de leur fabrication.

Le protocole optimal comportant un lavage à l'eau chaude, une pulvérisation des particules par une solution de bitume, un ajout d'agrégats siliceux de granulométrie adaptée à celle du ciment et une cure associant des périodes de retrait et d'immersion dans l'eau, permet de satisfaire aux objectifs fixés pour les quatre espèces végétales étudiées: le sapin des Vosges (*Abies* sp), une espèce de bambou (*Phyllostachys viridis*), le hêtre (*Fagus silvatica*) et le pin maritime (*Pinus maritima*).

La durée d'atteinte de la stabilité dimensionnelle restant trop grande pour une application industrielle, nous avons cherché à la réduire, soit par des traitements de carbonatation, soit en minimisant la durée des étapes de retrait et d'immersion des éprouvettes. Sans avoir abouti à une solution optimale, nous pensons avoir mis en évidence l'influence des étapes de retrait et d'immersion dans l'eau sur l'atteinte de la stabilité dimensionnelle.

Generalization and optimization of a wood/cement composite material to achieve dimensional stability in the presence of moisture variation

Abstract

Wood cement composites (called CBC) show many advantages, especially if they are dimensionally stable in the presence of the external moisture. Earlier experimental research with a Vosges fir/cement composite produced the following properties:

- Density lower than 1200 kgm^{-3}
- Crushing strength higher than 4 MPa
- Dimensional variations within the French Norm for light concrete, i. e., lower than 1 mm/m.

The research was developed to optimize four phases of the fabrication process:

- Elimination of the substances that restrict hydration of the concrete
- Treatment of the interface vegetable particles
- Addition of mineral charges and/or cement additives
- Cure of specimens after fabrication.

The optimized process consisted a hot water rinse of the particles, pulverization of the particles through a bituminous solution, addition of sand particles dimensionally adapted to the cement, and a cure combined with periods of drying and saturation in water; this process allows a satisfaction of these objectives for four species: Vosges fir, Beech, Maritime pine and Bamboo (*Phyllostachys. viridis*).

The desired period of dimensional stability is taken to be very long to motivate industrial interest. In this way, a time reduction is achieved through the carbonation treatment or to obtain the minimum phases of shrinkage and swelling.

The research has show that is not possible to obtain an optimum result, however it is obvious that the shrinkage and swelling phase's can be limited to obtain better dimensional stability of the specimens.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GENERALE

En mai 1988, à l'occasion du X^e congrès mondial de l'IUFRO (Division V) qui s'est tenu à São Paulo, nous avons eu l'occasion de faire la connaissance de chercheurs français et plus particulièrement du Professeur X. DEGLISE, directeur de l'ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies des Industries du Bois), qui nous a présenté les différents laboratoires de l'École et les activités de recherche en cours.

Parmi ces laboratoires, nous avons un intérêt plus particulier pour celui du Génie des Procédés dirigé par le Professeur A. ZOULALIAN dont une des activités concernait les composites associant une matière végétale à un liant minéral, le ciment. En effet, depuis 1984, nous développons à l'Université de Campinas des études sur les composites bambou-ciment.

En 1990, nous avons eu la chance de bénéficier d'une bourse du CNPq et il nous a été permis de rejoindre le laboratoire du Génie des Procédés pour préparer un doctorat dans le domaine des composites biomasse végétale-ciment et c'est avec beaucoup d'enthousiasme que nous avons abordé cette étude d'autant plus qu'elle bénéficiait du soutien d'un partenaire industriel, la Société A93 Constructique, prête à assurer le développement industriel du produit.

A mon arrivée, j'ai pris connaissance des études développées depuis plus de deux années par E. MOUGEL au sein du Laboratoire sur les composites associant du ciment à une essence peu inhibitrice (sapin des Vosges). A partir des résultats acquis, il m'a été tout d'abord demandé d'optimiser les différentes étapes d'un protocole de préparation permettant d'aboutir à un composite satisfaisant aux contraintes suivantes:

- une masse volumique inférieure à 1200 kg/m^3
- une contrainte à la rupture en compression supérieure à 4 MPa
- une variation dimensionnelle mesurée dans les conditions des normes françaises inférieure à 1 mm/m

Souhaitant déposer un brevet sur ce protocole expérimental, nous avons ensuite vérifié qu'il pouvait s'appliquer à différentes espèces

végétales (comme les bambous) même si ces dernières sont très inhibitrices de la prise du ciment.

Enfin, l'intérêt de ce matériau nous a conduit à chercher à réduire la durée d'atteinte de la stabilité dimensionnelle afin qu'elle n'excède pas la durée de stockage usuelle des blocs de béton obtenus par moulage. Dans les chapitres suivants, nous rapportons l'ensemble de notre étude et de nos réflexions qui se sont dégagées tout au long de ces quatre années de recherches.

Dans le chapitre II, nous avons voulu présenter une étude bibliographique approfondie sur les composites associant une espèce végétale et le ciment en analysant tout d'abord les différents éléments du composite: biomasse végétale, matrice ciment, puis leurs associations. Nous avons porté une grande attention aux problèmes d'incompatibilité entre la biomasse et le ciment et aux méthodes mises en oeuvre pour y remédier.

Notre travail a porté sur la réalisation d'éprouvettes de composites non comprimés, associant des particules de biomasse (traitées ou non), un liant minéral et divers additifs. Le chapitre III décrit les modes opératoires concernant la préparation des particules, leur traitement, leurs associations pour préparer des éprouvettes cubiques, parallélépipédiques et cylindriques. On précise les grandeurs mesurées au cours de la préparation (température d'hydratation) et à l'issue de la préparation (caractéristiques mécaniques, variations dimensionnelles). Pour les caractéristiques mécaniques une attention particulière est donnée aux méthodes non destructives. Enfin, on présente certains dispositifs mis en oeuvre pour les traitements visant à réduire la durée d'atteinte de la stabilisation dimensionnelle.

L'optimisation des trois principales étapes du protocole expérimental de préparation des composites (lavage, imprégnation, addition d'agrégats minéraux à la matrice ciment) et leurs généralisations aux quatre espèces végétales étudiées (sapin, bambou *Phyllostachys viridis*, hêtre, pin maritime) fait l'objet du chapitre IV. A l'issue de ce chapitre, nous confirmons la pertinence de notre protocole. Toutefois, la durée d'atteinte de la stabilité dimensionnelle reste trop longue pour une application directe à l'échelle industrielle.

Le chapitre V est une tentative pour réduire cette durée. Si les résultats acquis restent encore modestes, ils nous permettent de faire

certaines hypothèses sur la nature des traitements à effectuer pour atteindre, après préparation, la stabilité dimensionnelle.

La conclusion rappelle ces résultats et les perspectives d'études pour obtenir une durée de stabilisation minimale ou encore mieux son élimination. Ce dernier point constitue sûrement le défi à engager pour des études ultérieures sur les composites biomasse végétale-ciment.

CHAPITRE II

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
COMPOSITES BIOMASSE-CIMENT**

II.1 INTRODUCTION

Composite (lat. *compositus*) nom masculin: *matériau formé de plusieurs composants distincts dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possède* (Le petit Larousse).

Depuis toujours l'homme utilise un grand nombre de matériaux naturels dans sa vie quotidienne. A l'origine il choisissait des matériaux qui ne demandaient pas une élaboration sophistiquée, tels que les os d'animaux, les pierres et les morceaux de bois. Ensuite, il a commencé à élaborer des combinaisons entre ces matériaux pour fabriquer des armes et des outils. Au moment où il a dû quitter la sécurité des grottes pour aller chercher une nourriture plus lointaine, il a vite compris qu'il devait impérativement se bâtir un abri, en associant les divers matériaux disponibles sur place. On peut imaginer que les premiers prototypes d'habitations étaient constituées d'associations de parois en pierre, d'ossatures en bois, et de toitures en cuir ou en végétal.

La préoccupation de nos ancêtres était déjà axée sur les avantages de combiner des matériaux et d'obtenir un produit dont les caractéristiques se plaçaient au dessus de celles de ses constituants. Dans l'Ancien Testament on peut lire que le Pharaon d'Egypte disait "Vous ne donnerez plus comme auparavant de la paille au peuple pour faire des briques..."*. Pour contrecarrer la fissuration de l'argile, les ouvriers utilisaient donc une fibre d'origine végétale. Le mélange de la paille avec la terre humide augmente l'ouvrabilité et réduit la présence de fissures (MOSLEMI, 1988 a). Une autre technique est employée jusqu'à ce jour dans la campagne brésilienne pour la fabrication de petites maisons. On utilise une ossature en bois ou en bambou et un revêtement en argile parfois mélangé à du fumier de bovins. L'herbe sèche est utilisée pour renforcer l'argile.

Actuellement, on peut conclure que la presque totalité des matériaux utilisés dans différents domaines, peut être considérée comme des "composites". Certains matériaux peuvent être définis comme des composites naturels. Citons par exemple, le bois, le bambou, et bien d'autres substances naturelles. Il s'agit en effet de mélange entre éléments appelés "fibres", enrobés par une matrice organique appelée lignine. Selon

* Exodus 4,5

SIMATUPANG (1987) l'ossature de carbohydrates est imbibée de lignine amorphe tridimensionnelle de la même manière qu'une tige d'acier est employée comme renfort du béton.

D'autres composites artificiels, tels que les alliages et le béton, se trouvent parmi les matériaux les plus utilisés par l'homme moderne. On peut même estimer, d'une façon globale, le degré de développement d'un pays par la production et la consommation de ces matériaux.

Le but de l'association de plusieurs matériaux de caractéristiques différentes est d'obtenir un composite dont les performances sont généralement améliorées d'un point de vue mécanique, économique, ouvrabilité, etc. Les matériaux composites sont intéressants car ils ont des bonnes performances spécifiques (rapport performance/poids). Les composites peuvent être divisés en deux catégories:

une première catégorie - correspondant à ceux dont le coût est le paramètre le plus important;

une deuxième catégorie - comportant les matériaux dont le paramètre "propriété" est le plus important.

Généralement très peu de produits peuvent être classés dans les deux catégories (ROWELL et coll., 1991).

Depuis plusieurs années, diverses recherches ont été effectuées pour renforcer les produits à base de ciment par des fibres artificielles tels que des fibres de verre (composites CCV), d'acier, de carbone, etc. Les composites obtenus présentent de très bonnes résistances mécaniques, mais sont pénalisés par des aspects économiques, ou par leur comportement vis à vis de l'environnement. Le bois, a été également choisi pour le renforcement des produits à base de ciment, soumis à des sollicitations mécaniques plus faibles. Dans les années 1960, un très grand nombre de recherches ont été réalisées dans le domaine des bétons de fibres, ce qui a permis la transformation d'une "idée" en "réalité" (CURTIS et HANSEN, 1974).

De part leur grande disponibilité, les matériaux lignocellulosiques sont depuis longtemps étudiés pour le renforcement des produits à base de ciment. Pour mieux comprendre les mécanismes qui empêchent l'obtention de produits finis satisfaisants, on va tout d'abord faire quelques rappels sur les constituants majeurs des composites lignocellulosiques-ciment, à savoir :

les matières lignocellulosiques, le ciment et l'interface entre ces deux matériaux.

II.2 BIOMASSE VEGETALE

Les matériaux lignocellulosiques obtenus à partir d'une biomasse végétale quelconque peuvent être considérés comme des combinaisons entre des "fibres" de cellulose, longues chaînes moléculaires partiellement cristallisées, et une matrice constituée de lignine et d'hémicelluloses, composés amorphes (DORLOT et coll., 1986). Dans certains pays qui disposent d'une agriculture développée, les résidus agricoles constituent une source importante, qui ne trouve pas, pour l'instant, une valorisation. Ceci constitue aujourd'hui un problème sérieux pour l'environnement (IRLE et SIMPSON, 1993; ROWELL et coll., 1993).

Dans notre travail de recherche qui est dirigé vers l'obtention d'un composite biomasse-ciment dimensionnellement stable, nous nous sommes intéressés essentiellement à différentes essences de bois (sapin, hêtre et pin maritime) et un espèce végétale de bambou. Ces deux substances végétales présentant quelques différences notables, nous allons dans ce qui suit les distinguer afin de mieux comprendre par la suite leur comportement vis à vis du ciment.

II.2.1 BOIS

Le bois est la matière première la plus abondante dans la nature, et il est utilisé par l'homme pour ses différents besoins. Surexploité, il commence à se raréfier dans certaines régions de la planète. Ceci concerne principalement certaines espèces "nobles" (acajou, palissandre, ébène, etc.) dont le coût actuel atteint des chiffres considérables. Cependant un très grand nombre d'espèces ne sont pas suffisamment valorisées, de même que les résidus provenant des scieries, des usines de meubles, et de plusieurs autres industries de transformation du matériau bois.

La forêt française couvre plus d'un quart de la surface du pays, et représente près d'un tiers de la surface boisée de la CEE, soit environ 15 millions d'hectares (CTBA, 1991). Les feuillus représentent près des 2/3 de la surface forestière, les résineux occupent le tiers restant. Parmi les feuillus le chêne est prépondérant (41%), tandis que parmi les résineux le

pin maritime occupe la place la plus importante (11%) (BAZIRE et GADANT, 1991).

Selon les mêmes auteurs, la France, premier producteur de feuillus d'Europe, reste encore déficitaire en ce qui concerne l'utilisation des résineux. La croissance des ressources forestières françaises permettra de placer la France, dans un avenir très proche, dans une position privilégiée par rapport aux autres pays européens (CTBA, 1991).

II.2.1.1 ANATOMIE DU BOIS

Grosso modo, et d'un point de vue macroscopique, on peut considérer les bois comme étant constitués de tubes minces (fibres chez les feuillus et trachéides chez les résineux) et de tubes de diamètre plus importants (vaisseaux), disposés parallèlement à l'axe principal de l'arbre, suivant des arrangements tangentiels (cernes de croissance). Ces tubes sont entrecroisés par d'autres sortes de tubes (rayons ligneux), disposés cette fois-ci transversalement à l'axe principal de l'arbre (figure 1). L'ensemble de cette ossature tubulaire est enrobée d'une matrice constituée de cellules de parenchyme.

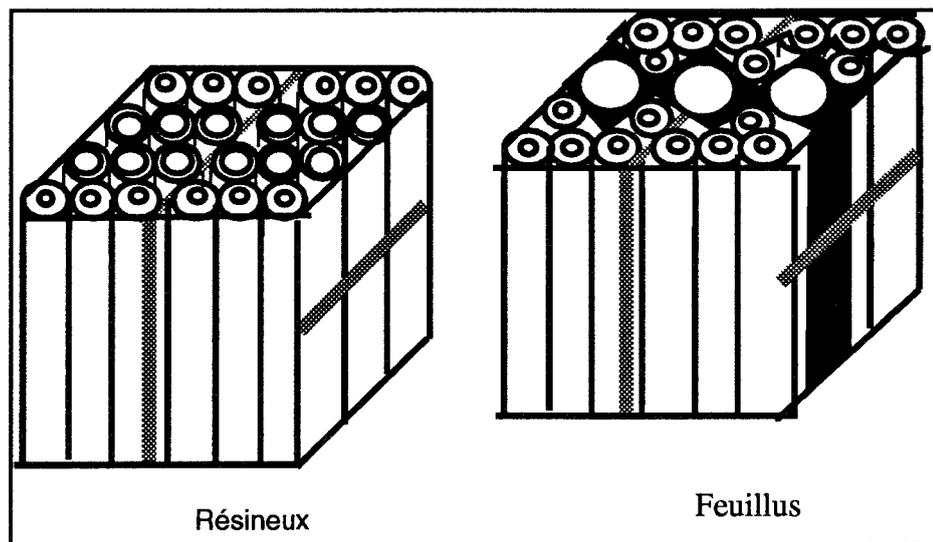


Figure 1- Schéma de la structure anatomique du bois

On remarque des différences importantes si l'on compare les structures anatomiques des résineux (ou conifères) et des feuillus. Selon KELLER (1988), les différents constituants du bois peuvent être classifiés de la façon suivante :

- a) **tissus de conduction** (trachéides longitudinales surtout dans le bois initial chez les résineux, et vaisseaux chez les feuillus);
- b) **tissus de réserve et de transformation** (parenchyme radial et parenchyme longitudinal);
- c) **tissus de soutien** (trachéides longitudinales des résineux, en particulier celles du bois final, et fibres chez les feuillus).

On peut dire que les feuillus sont plus développés que les résineux car ils présentent des éléments anatomiques (les vaisseaux) qui ont pour fonction le transport de la sève, des fibres soudées par la lignine, qui ont un rôle de maintien. Dans le cas des conifères, les trachéides cumulent les fonctions de transport et de soutien mécanique.

Les trois directions: axiale (longitudinale), radiale et tangentielle constituent les axes d'anisotropie du bois. Les propriétés physico-mécaniques sont fortement corrélées selon les directions considérées : le bois est très résistant aux efforts de traction, moyennement à ceux de compression quand ils sont exercés parallèlement aux fibres, et il est beaucoup moins résistant quand il s'agit d'un effort appliqué selon l'axe transversal aux fibres (tableau I).

Nom vernaculaire	Masse Volumique (kg/m ³)	Module d'Young (GPa)	Tension parallèle (MPa)	Tension perpend. (MPa)	Flexion statique (MPa)	Compr. parallèle (MPa)	Compr. perpend. (MPa)
Cèdre rouge	310	8,0	65,0	1,5	54,0	30,0	3,4
Sapin	340	9,6	88,0	1,2	59,0	34,0	3,2
Peuplier	370	11,5	120,0	3,5	70,0	37,0	2,9
Epicéa	400	10,5	90,0	2,4	70,0	38,0	4,3
Douglas	450	13,6	130,0	2,6	88,0	49,0	6,0
Frêne	580	12,0	175,0	6,0	105,0	51,0	8,5
Erable	600	12,6	180,0	4,8	110,0	54,0	10,0
Bouleau	600	13,9	165,0	6,4	114,0	56,0	6,7
Chêne blanc	640	12,3	150,0	5,5	108,0	53,0	7,4

Tableau I - Caractéristiques mécaniques des bois (D'après DORLOT et coll., 1986)

En analysant les données du tableau I, on peut observer la corrélation qui existe entre le comportement mécanique et la masse volumique d'une espèce considérée. Plus forte est la masse volumique, plus grande est la résistance mécanique. Toutefois, si on raisonne sur la résistance spécifique (rapport entre la résistance et la masse volumique), on peut conclure que les résineux sont très intéressants pour les utilisations où le facteur poids est très important. GUITARD et coll. (1991) ont présenté une comparaison entre les résistances spécifiques de plusieurs matériaux. Les bois occupent toujours les premières places, dépassant largement les matériaux conventionnels tels que les aciers et les bétons.

La masse volumique du bois est liée à la proportion relative entre ses éléments constitutants. La masse volumique réelle du matériau bois est d'environ $1,50 \text{ g/cm}^3$. Les différences observées entre les espèces ou dans les échantillons issus du même arbre, sont en partie causées par une variabilité dans la répartition de ses constituants fondamentaux. La présence de défauts naturels localisés, tels que les noeuds ou les bois de réaction, provoque une augmentation localisée de la masse volumique, sans que l'on observe pour autant une augmentation de la résistance mécanique. On peut même souvent constater une diminution de celle-ci.

II.2.1.2 COMPORTEMENT DU BOIS EN PRESENCE DE VARIATIONS DE L'HUMIDITE

Le taux d'humidité du bois (par rapport au poids sec), au moment de l'abattage, est élevé. Pour certaines espèces, et selon la période de l'année, il peut atteindre des valeurs qui dépassent 100%. Au fur et à mesure que le bois sèche il perd tout d'abord l'eau qui est libre dans ses cavités cellulaires, sans subir une réduction de ses dimensions, jusqu'au moment où le taux d'humidité s'approche du "point de saturation des fibres - PSF" (entre 20 et 30%). Au dessous de cette valeur, la perte d'humidité entraîne une réduction des dimensions du bois (retrait). Le phénomène inverse qui est l'absorption d'eau, provoque le gonflement du bois, si celui-ci est à un taux d'humidité inférieur au PSF. Le comportement du bois vis à vis d'un gonflement est identique à celui observé lors du retrait.

Comme toutes les caractéristiques du bois, le retrait et le gonflement sont dépendants de l'axe considéré. Les variations dimensionnelles obtenues selon l'axe longitudinal sont généralement négligeables (inférieures à 0,5%). En revanche on observe des valeurs beaucoup plus élevées selon les deux

autres axes : la valeur tangentielle peut dépasser de deux fois celle obtenue selon l'axe radial. La stabilité dimensionnelle d'un bois donné présente une corrélation étroite avec le rapport entre les déformations tangentielles et les déformations radiales (les bois les plus stables ont un rapport déformation tangentiel/radial inférieur à 2).

Souvent, on utilise une méthode géométrique pour la détermination des variations dimensionnelles du bois. Pour l'obtention du retrait on utilise des échantillons de bois verts (humides), sur lesquels on place des repères (métalliques ou points tracés avec un crayon spécial). Ensuite les échantillons sont séchés jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Le retrait total (RT) et le gonflement total (GT) sont calculés par:

$$RT = \frac{LA - LS}{LS} * 100\% \quad GT = \frac{LS - LA}{LA} * 100\%$$

Les dimensions des échantillons sont relatives aux états limites, c'est-à-dire: "LA" est la dimension de l'échantillon à l'état anhydre tandis que "LS" est celle correspondant à la saturation. Il est intéressant de noter que l'ancienne norme française utilisait la deuxième formule dans le calcul du retrait. Comme la valeur du dénominateur était plus faible, on trouvait toujours une valeur plus élevée pour le retrait, ce qui pénalisait les espèces de bois françaises lors d'une comparaison avec les espèces dont le retrait était calculé selon la première formule.

On peut également calculer les variations volumiques totales d'un échantillon de bois. Il existe différentes méthodes utilisées en laboratoire. Ces méthodes répondent aux différentes normes d'essais. On peut citer:

a) Méthode hydrostatique (ou d'Archimède): Cette méthode permet le calcul du volume déplacé par l'immersion de l'échantillon dans l'eau (ou dans un liquide quelconque dont la densité est connue). Le dispositif expérimental est relativement facile à réaliser si le bois est humide; en revanche dans le cas de bois sec, l'enrobage de celui-ci par de la paraffine peut piéger un certain nombre de bulles d'air, ce qui conduit à des erreurs de mesure. La substitution de l'eau par du mercure (prévue dans la norme Brésilienne) entraîne à son tour la possibilité de pénétration de gouttes de liquide dans les orifices du bois, et en conséquence une altération du volume à mesurer. De plus, l'utilisation du mercure n'est pas très recommandée pour la santé humaine.

b)Méthode géométrique: De même que lors de la mesure des retraits dits linéaires, on peut évaluer le volume de l'échantillon par la mesure des dimensions observées dans différentes conditions d'humidité. On considère que le parallélisme des faces de l'échantillon est parfait, ce qui n'est pas facile à obtenir dans les conditions opératoires d'usinage.

Plusieurs laboratoires utilisent un méthode dérivée de la méthode géométrique, qui considère la variation dimensionnelle volumique totale (VV) comme étant la somme des variations dimensionnelles radiale (VR), tangentielle (VT) et axiale (VA). Comme cette dernière est souvent négligeable, on calcule fréquemment la variation volumique par la relation:

$$VV=VR +VT$$

Le séchage du bois au-dessous du PSF permet une amélioration nette de toutes ses caractéristiques. Ainsi, les caractéristiques mécaniques d'un bois à 10% d'humidité sont en général largement supérieures à celles du même bois à 20%. En revanche, lorsque le bois est humide il présente une meilleure résistance aux chocs.

II.2.1.3 BOIS MODIFIES

Aujourd'hui il est très difficile de trouver du bois de sciage de dimensions importantes. On est obligé d'exploiter des arbres de petite taille, qui permettent seulement l'obtention de bois de sciage de dimensions limitées. Par ailleurs, l'hétérogénéité du bois soumis aux efforts mécaniques ou aux variations d'humidité n'en permet pas une utilisation optimale.

Il faut créer une nouvelle philosophie des produits forestiers: celle de composites à base de bois. On peut profiter de la structure remarquable du bois, en évitant de la détruire le plus possible, afin de préserver ses propriétés de base tout en développant en parallèle un génie industriel du bois (GUITARD et coll., 1991).

Selon BAZIRE et GADANT (1991) lorsque l'on produit un certain volume de bois d'oeuvre on obtient pendant ces opérations de transformation une quantité de résidus considérable, qui serait largement suffisante pour les besoins des industries de trituration.

DORLOT et coll. (1986) ont affirmé que la production de ces bois modifiés ou reconstitués minimise les contraintes dues à l'hétérogénéité du bois, et permet d'aboutir à un produit ayant les caractéristiques suivantes:

- a) propriétés constantes et isotropes;
- b) augmentation de la taille des pièces (poutres, panneaux, etc.);
- c) utilisation des arbres de petits diamètres;
- d) amélioration du rendement matière.

Parmi les plus importantes catégories de matériau dérivé du bois on peut citer: le lamellé-collé, le contreplaqué, le panneau de particules, et le panneau de fibres.

LAMELLE-COLLE

Il s'agit d'une technologie très intéressante qui permet, à partir de pièces de bois de faibles dimensions, d'obtenir par collage des pièces de dimensions importantes et de formes variées. Cette technologie est largement employée dans l'industrie du bâtiment pour la construction de salles de sports, d'hypermarchés, et d'autres grandes surfaces.

CONTRE-PLAQUE

On a vu que la variation dimensionnelle du bois selon l'axe longitudinal est négligeable. La technologie du contreplaqué est basée sur le collage d'un certain nombre de feuilles de bois obtenues par déroulage de grumes. On obtient un composite plus stable vis à vis de l'humidité, qui est utilisé dans l'industrie du meuble et du bâtiment.

PANNEAU DE PARTICULES

Les scieries et les usines de contreplaqués produisent une quantité considérable de déchets, qui après triage peuvent être utilisés comme matière première pour la fabrication des panneaux de particules. Les particules de géométrie particulière sont encollées avec une résine thermodurcissable. Le mélange est ensuite pressé à chaud pendant un certain temps. Ces panneaux, très utilisés dans la fabrication de meubles et dans la construction, ont souvent une faible stabilité dimensionnelle en présence d'humidité.

PANNEAU DE FIBRES

Contrairement aux panneaux décrits précédemment, celui-ci est fabriqué à partir de "fibres" de bois, obtenues par voie mécanique ou chimique. La cohésion est naturelle ou assurée par la jonction de résine synthétique. Ce type de panneau peut être facilement usinable. L'utilisation la plus fréquente est aussi la fabrication de meubles.

Sur la figure 2 on peut observer la large domination des panneaux de particules sur le marché des produits semi-finis. Ces panneaux sont présents sur le marché sous différentes spécifications telles que "Waferboard", "Structural Board" et "Oriented Structural Board".

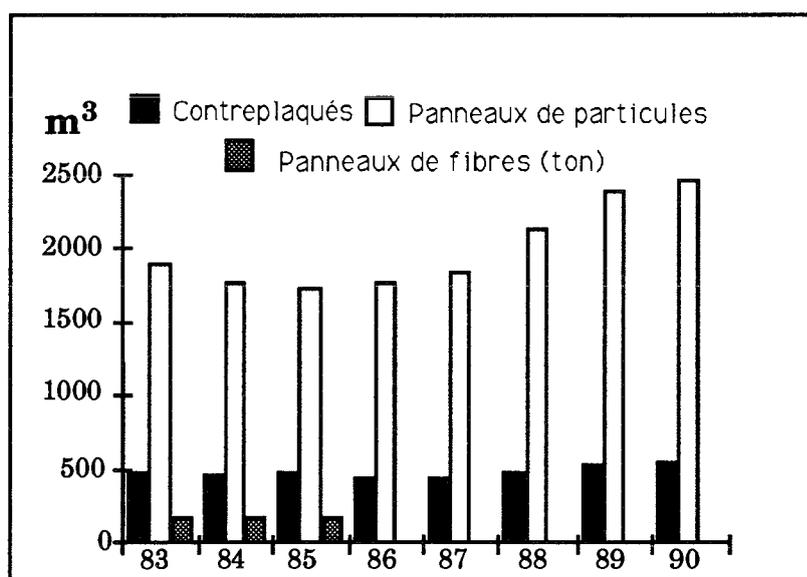


Figure. 2 - Production française de bois modifié (D'après CTBA, 1991)

Le comportement des panneaux de particules face à l'humidité et aux intempéries empêche d'élargir leur utilisation en milieu extérieur. Il subsiste donc une partie non négligeable du marché, qui pourrait être occupée par des produits dérivés du bois, à condition d'améliorer leur comportement vis à vis des variations climatiques extérieures.

II.2.2 BAMBOU

Le bambou n'a pas encore subi une exploitation intense et peut éventuellement remplacer le bois. Son exploitation pourrait préserver les ressources forestières (JIAN et MING, 1992). Un rapport de l'ONU (1972) a conclu que l'amélioration des propriétés des matériaux et des techniques correspondantes serait très intéressante pour permettre la construction de maisons en milieu notamment rural dans les pays en voie de développement. Le bambou et le rattan ont été analysés et proposés comme étant les matières premières les plus adéquates pour résoudre le problème d'habitation.

II.2.2.1 INTRODUCTION

Le bambou est considéré comme une des plus anciennes matières premières utilisée pour un très grand nombre d'applications différentes par les peuples des pays tropicaux. Il est le plus important matériau de construction à l'est du Pakistan, à Java et à Taiwan (GROSSER et LIESE, 1971). De par la multitude de ses utilisations le bambou est connu comme "le roi de l'Orient". Parmi toutes les régions de la planète, la province d'Yunam (Chine) détient tous les records du nombre d'espèces et de genres de bambou. Pour cette raison on lui a attribué le nom de "Royaume du bambou", ce qui est totalement justifié (JIANG et MING, 1992).

Les forêts de bambou occupent en Asie une surface d'environ 5 millions d'hectares. UEDA (1981) a constaté l'existence au Japon, de plus de 120000 hectares occupés par les espèces *P. bambusoides* (Bambou "Medake") et *P. pubescens* (Bambou "Mosso"). JIAN et MING (1992), parlent d'une surface d'environ 300000 hectares dans la province d'Yunam.

La productivité moyenne du bambou est de 20 t/ha (UEDA, 1981), ou entre 20 t/ha à 30 t/ha (ONU, 1972). Au Brésil, selon GOMIDE et coll. (1988), la productivité de *B. vulgaris* serait plus faible (10 t/ha). LOPEZ (1974) a présenté des chiffres très optimistes de 31 t/ha pour le bambou "guadua" en Colombie.

On peut trouver les différentes espèces de bambous à l'état naturel dans tous les continents à l'exception de l'Europe. Cependant depuis longtemps des espèces adaptées au climat tempéré y ont été introduites. Actuellement on peut trouver une très importante collection de bambous en

Actuellement on peut trouver une très importante collection de bambous en France, au lieu-dit "Bamboueraie de Prafrance", où se trouve l'actuel siège de l'Association Européenne du Bambou. Par l'intermédiaire de cette association, nous avons pris connaissance d'un important réseau européen constitué de chercheurs et d'amateurs, surtout intéressés par les aspects de la sylviculture du bambou. Certaines espèces de bambous supportent de très basses températures (-10 °C), et on peut les découvrir au jardin botanique de Nancy.

II.2.2.2 SYLVICULTURE DU BAMBOU

Certains aspects de l'étude de bambou restent encore couverts de mystères et de contradictions. Le nombre d'espèces et de genres considérés reste encore un sujet de discussions: GROSSER et ZAMUCO JR (1971) affirment qu'il y a entre 600 à 700 espèces, qui sont représentées par 60 genres. Pour GHAVAMI et HOMBECK (1981) ces deux nombres sont respectivement de 1000 et de 75. LOPEZ (1974) à son tour, parle de l'existence de 550 à 1250 espèces réparties entre 30 à 47 genres (dont 13 genres spécifiques au Japon). SCHNIEWIND (1989) parle de 750 espèces et 45 genres.

On peut comprendre la raison d'un tel désaccord en rappelant que la classification botanique d'un végétal quelconque prend souvent en compte la morphologie de ces fleurs et de ces fruits. Or, selon plusieurs auteurs, certaines espèces de bambous fleurissent une seule fois durant leur existence et disparaissent ensuite, comme si elles avaient un "horloge biologique ou physiologique". UEDA (1981) a rapporté qu'entre 1965 et 1970 presque toutes les forêts de bambou "medake" au Japon ont péri. LOPEZ (1974) considère comme un grand mystère de la nature la disparition presque simultanée de tous les exemplaires d'une même espèce, aussitôt après la floraison. Ces bambous de différents âges peuvent fleurir simultanément dans un rayon de 1000 km (LIESE, 1987). On peut imaginer le désordre au niveau de l'économie d'une région si celle-ci est basée sur une seule et unique espèce de bambou. Même les pandas géants ont été menacés par la floraison du bambou *Thamnocalamus* en 1979*. Toutefois les intervalles de floraisons sont assez grands (20, 30 ans ou même un siècle). Pour certaines espèces le cycle semble être encore plus long.

* Magazine Globo Rural, Brésil (1991)

Malgré le grand nombre d'espèces, tous les bambous poussent de deux manières différentes (figure 3). Les bambous pachymorphes - "forme épaisse" (chaumes groupés ou cespiteux) et les bambous leptomorphes - "forme mince" (chaumes individuels ou traçants). Les premiers sont des bambous de climat tropical (Ouest Asiatique) et les autres sont des bambous de climat tempéré, qui peuvent supporter de très basses températures. Leurs systèmes racinaires fortement développés forment parfois un réseau d'une centaine de kilomètres à l'hectare, qui s'avère très efficace contre les séismes (LOPEZ, 1974). JIAN et MING (1992) proposent l'utilisation des bambous pachymorphes pour les constructions, car ils présentent les parois les plus épaisses. UEDA (1981) a affirmé que la propagation du genre *Phyllostachys* est impossible sous forme de chaumes coupés.

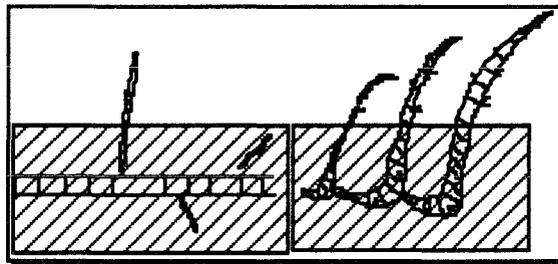


Figure 3 - Bambou leptomorphe (à gauche) et bambou pachymorphe (à droite)

Dans le premier groupe (pachymorphe) on trouve principalement les genres *Dendrocalamus* et *Bambusa*, tandis que dans le deuxième (leptomorphe) on trouve le genre *Phyllostachys*. Les espèces appartenant au genre *Dendrocalamus* sont connues sous le nom vernaculaire de "bambou géant". On remarque qu'à la Bamboueraie de Prafrance les bambous appelés "géants" appartiennent au genre *Phyllostachys*. On peut comprendre une telle dénomination car il s'agit de tiges d'une hauteur qui dépassent une quinzaine de mètres.

Contrairement aux bois, les bambous ont une croissance seulement longitudinale, car ils sortent déjà du sol avec leur diamètre définitif. De plus, chez les bambous, les éléments responsables de la conduction de l'eau dans le xylème et des carbohydrates dans le phloème restent toujours fonctionnels (LIESE, 1987).

On peut dire d'une manière simplifiée que la croissance des bambous est semblable à la mise en place d'une antenne de radio télescopique. Parmi les records de croissance journalière on peut citer l'incroyable chiffre de 121

cm qui a été observé par UEDA à Kyoto (Japon). GHAVAMI (1992) a observé au Brésil, une croissance plus modeste pour le *D. giganteus* : environ 30 cm en 24 heures. Selon l'auteur, après trois mois, le chaume avait 21 mètres de hauteur. De façon approximative, on peut dire que les bambous appartenant au groupe leptomorphe ont une période de croissance de 30 à 60 jours, tandis que pour ceux du groupe pachymorphe, elle se situe entre 80 et 180 jours (LOPEZ, 1974). LIESE (1987) a présenté des chiffres de croissance journalière moyenne compris entre 20 et 100 cm.

A la fin de sa croissance, le bambou commence à mûrir, ce mûrissement peut se poursuivre de 3 à 6 ans. Après cette période, très variable selon les espèces, le bambou atteint le maximum de sa résistance. Les facteurs qui influencent la vitesse de croissance sont l'époque de l'année, mais surtout les conditions climatiques. Certains pensent que la période dans le cycle lunaire pendant laquelle est coupé le bambou a une influence sur ses caractéristiques. Selon les paysans colombiens et brésiliens, pour obtenir un bambou de bonne qualité, il est nécessaire de le couper quand la lune est "descendante". Selon LIESE (1987) les analyses chimiques et biologiques n'ont pas pu confirmer l'âge exact de la maturation du bambou.

Le tableau II présente les dimensions moyennes des principaux bambous utilisés au Brésil. Ces dimensions ne sont pas constantes dans le même chaume, car la distance entre les noeuds est variable. Plus la hauteur est importante, plus épaisse est la paroi.

Nom vernaculaire	Nom botanique	Hauteur(m)	Diamètre(cm)	Epaisseur(mm)
Bambou-géant	<i>D. giganteus</i>	12 à 30	8 à 40	8 à 30
Bambou-vert	<i>B. tuldoides</i>	6 à 17	5 à 10	5 à 8
Bambou-commun	<i>B. vulgaris</i>	6 à 21	8 à 12	6 à 9
Bambou-impérial	<i>B.v. vittata</i>	6 à 25	8 à 15	6 à 9
Bambou-chinois	<i>P. purpuratta</i>	3 à 5	2 à 4	1 à 2

Tableau II- Caractéristiques géométriques des principales espèces de bambou

Selon LOPEZ (1974), la hauteur d'un chaume peut être évaluée comme étant égale à soixante fois sa circonférence mesurée "à hauteur des yeux". Pour mesurer le volume de la matière d'un chaume de bambou il faut le considérer comme un tronc conique.

II.2.2.3 ANATOMIE DU BAMBOU

Les chaumes de bambous peuvent être considérés comme un ensemble de tubes séparés par deux noeuds constitués d'une sorte de paroi appelée diaphragme. La région du chaume entre deux diaphragmes, appelée entre-noeud, est généralement creuse (figure 4). La taille des entre-noeuds est très variable suivant les différentes espèces et même selon la position dans un même chaume. Les noeuds apportent une plus grande rigidité au bambou (LOPEZ, 1974). La couche externe d'un chaume est recouverte d'une sorte de vernis naturel, tandis que la couche interne est recouverte d'une espèce de membrane. L'une et autre ne présentent pas une bonne compatibilité aux adhésifs (XUHE et KELIN, 1990).

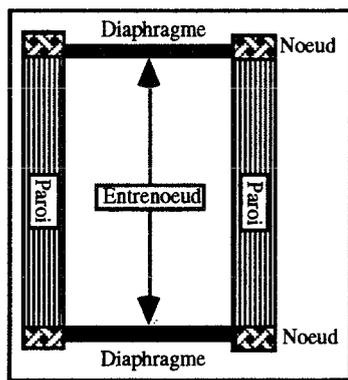
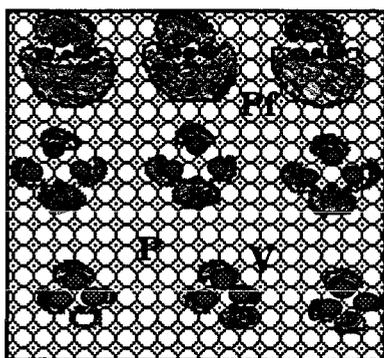


Figure 4 - Coupe longitudinale d'un chaume de bambou

Les branches existantes sont disposées de façon alternée surtout dans la partie supérieure du chaume. Pour les espèces de petit diamètre on aperçoit plus nettement, une sorte de canal extérieur disposé longitudinalement et qui présente également une alternance. En conséquence la section transversale d'un chaume de bambou de petit diamètre est presque elliptique. Pour d'autres bambous elle est même très proche de la forme de coeur.

Sur le plan anatomique, les bambous sont très différents du bois. On remarque principalement l'absence de rayons ligneux. La proportion, l'arrangement et la taille des éléments anatomiques fondamentaux (faisceaux de fibres, vaisseaux et cellules de parenchyme) sont variables selon l'âge, et leur position dans le chaume (noeud ou entre-noeud). Les cellules de parenchyme ont une dimension moyenne comprise entre 20 et 100 μm , tandis que celles des gros vaisseaux se situent entre 40 et 120 μm . Les vaisseaux ont une taille plus importante du côté interne de la paroi (SCHNIEWIND, 1989).



Il existe une plus grande concentration de faisceaux de fibres (Pf) au fur et à mesure que l'on se déplace des couches extérieures vers les parois internes du chaume. Il y a de grands changements dans la dimension et le nombre de vaisseaux (V). Selon LIESE (1987), le xylème conducteur est constitué d'un ou de deux petits protoxylèmes et de deux grands vaisseaux de métaxylème (figure 5).

Figure 5 - Coupe transversale de la paroi du bambou: P (parenchyme), V (Vaisseau), Pf (faisceau de fibres)

D'autre part, les couches intérieures sont les plus riches en parenchyme (P) et disposent d'une plus grande quantité de réserves de substances. Généralement les espèces qui présentent les plus grandes épaisseurs de parois sont les plus sensibles aux attaques des insectes et des champignons. Ces attaques commencent rarement par la région externe*.

GROSSER et ses collaborateurs (LIESE, 1971; ZAMUCO, 1971; LIESE, 1973) ont affirmé que les différents genres de bambous peuvent être regroupés selon la disposition de leurs éléments anatomiques dans la direction radiale. On distingue principalement quatre configurations (figure 6). Toutefois les mêmes auteurs ont vérifié que cette disposition est aussi fonction de la hauteur à laquelle les échantillons ont été prélevés. De tels changements coïncident avec la réduction de l'épaisseur de la paroi (GROSSER et LIESE, 1971).

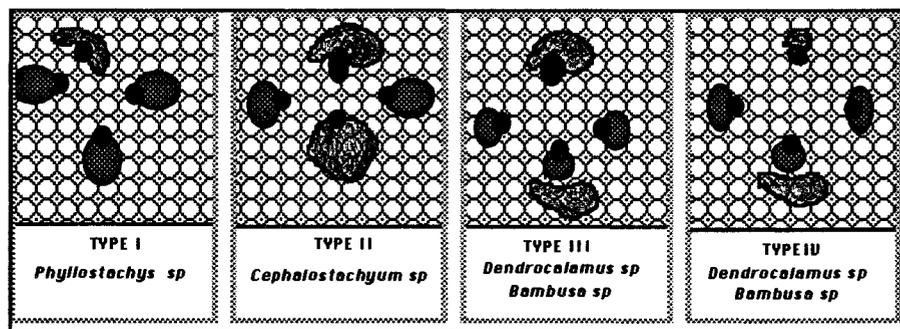


Figure 6 - Schéma des différentes configurations anatomiques des bambous

* LOPEZ O.H., Revue Bambou, AEB (1990)

LOPEZ (1974) a donné les dimensions moyennes des éléments anatomiques du bambou. Les fibres ont une longueur de 2,2 à 2,6 mm et une largeur de 7 à 27 μm ; les vaisseaux ont une dimension d'environ 100 μm ; les cellules de parenchyme ont des dimensions de 0,25 mm et 65 μm .

Selon LIESE (1987) les propriétés physico-mécaniques d'un chaume dépendent principalement de son anatomie. La proportion moyenne des constituants principaux est d'environ, 50% de parenchyme, 40% de fibres et 10% de tissus de conduction. GHAVAMI et HOMBECK (1981) ont démontré que la concentration moyenne de fibres dans la paroi interne est de 15 à 30%, tandis que dans la paroi externe elle est de 40 à 70%.

KUMAR et DOBRIYAL (1992) ont mesuré les diamètres des vaisseaux du *D. strictus* dans chaque partie de la paroi du chaume (interne, intermédiaire, externe). Dans le premier cas, les vaisseaux ont un diamètre de 100 μm , dans le second, 85 μm et dans le troisième 60 μm . Même si le nombre de vaisseaux est plus important dans la paroi externe, la surface totale occupée dans les trois cas reste de l'ordre de 7%.

XUHE et KELIN (1990) ont présenté quelques caractéristiques technologiques des fibres du bambou. La longueur est de 2,5 mm et la largeur est de 13 μm , la dimension de ces fibres est intermédiaire entre celle des résineux et des feuillus. L'indice de souplesse (longueur sur largeur) est toujours supérieur à 150; l'indice de Runkel (le double de l'épaisseur de la paroi sur le diamètre interne) est inférieur à 1. Ces chiffres sont supérieurs à ceux du bois. TAMOLANG et coll. (1960) ont étudié les dimensions des fibres de 8 espèces de bambous. La longueur était comprise entre 1,36 et 2,00 mm; la largeur entre 18 et 22 μm ; l'épaisseur de la paroi entre 6,5 et 9,0 μm ; la largeur du lumen entre 2 et 7 μm .

II.2.2.4 BAMBOUS UTILISES AU BRESIL

La plus grande partie des bambous utilisés actuellement au Brésil sont d'origine asiatique. Ils ont été importés par les colons portugais (*Dendrocalamus* et *Bambusa*) ou plus récemment par les immigrants asiatiques (*Phyllostachys*). Toutefois, LOPEZ (1978) a rapporté la découverte en 1976, dans l'Amazonie brésilienne, d'une surface considérable de *Bambusa guadua*, qui est aussi l'espèce prédominante en Colombie. Elle est utilisée principalement pour les constructions.

Aujourd'hui les bambous font partie du paysage rural brésilien. Ils sont employés de plusieurs façons, et reçoivent la dénomination de "bois des pauvres", à cause de leur faible prix d'achat. LOPEZ (1974) affirme que cette idée préconçue en Colombie d'associer le bambou à la misère ou à la pauvreté, a inhibé le développement du bambou "guadua" dans la construction.

Contrairement aux pays asiatiques et certains pays d'Amérique, au Brésil les bambous ne sont employés que dans le milieu rural. Ses emplois y sont très nombreux: tuteurs pour les plantes, démarcation des courbes de niveau (topographie), enclos, planchers, mangeoires, nattes, paniers, plafonds, protections des terrains, coupe-vent, contrôle d'érosion, charbon, drainage, conduction de l'eau, alimentation, artisanat, loisirs, abris pour les animaux, etc.

LOPEZ (1978) a noté l'existence de quatre usines de pâte-à-papier au Brésil, qui utilisent le bambou comme matière première. Nous n'avons pas pu confirmer cette affirmation. Il semble que l'utilisation partielle ou totale de fibres de bambou dans les usines de pâte-à-papier a été abandonnée pour des raisons d'ordre technologique. Pourtant le papier à base de fibres de bambou était toujours considéré comme d'excellente qualité. En Inde, 70% de la production de papier provient du bambou (LOPEZ, 1974). La longueur des fibres est comprise entre 1,5 et 4,5 mm (LIESE, 1987).

II.2.2.5 PROPRIETES GENERALES DU BAMBOU

En comparaison à d'autres matériaux de construction, le bambou présente plusieurs avantages : bonne résistance mécanique, résistance spécifique (résistance par unité de poids) très élevée. C'est un matériau qui se renouvelle rapidement et dont le coût est faible. De plus il peut facilement se combiner à d'autres matériaux et ses sous-produits sont particulièrement intéressants.

Par rapport au bois, le bambou présente certains avantages, tels qu'une croissance plus rapide et une productivité plus élevée (t/ha/an). Il est plus léger et donc facile à transporter. Et enfin, il est susceptible de s'adapter à plusieurs types de sols et de climats (LOPEZ, 1974).

Les inconvénients du bambou sont liés principalement aux aspects de sa sylviculture particulière. En effet, la culture du bambou n'est pas évidente. On rencontre de grandes difficultés à obtenir des semences pour

certaines espèces. De plus à cause de sa constitution chimique plus riche en sucres, le bambou est généralement plus vulnérable aux attaques des champignons et des insectes. Il faut encore ajouter des difficultés à réaliser des assemblages, car la résistance du bambou au fendage est très réduite, ce qui est toutefois un avantage pour sa découpe. GHAVAMI (1988) a étudié les assemblages de bambou pour l'obtention des treillis spatiaux. Il a conclu que les difficultés majeures de fabrication sont liés aux jonctions entre les chaumes.

Enfin, le bambou est un matériau biologique qui présente d'autres inconvénients comme: une très faible durabilité naturelle, une combustibilité, des variations dimensionnelles très élevées, une faible adhérence naturelle aux liants, des sections réduites et une conicité des chaumes, une variabilité des propriétés mécaniques selon l'échantillonnage, la présence de substances inhibitrices à la prise du ciment. De plus, le bambou ne peut pas être débité.

Pour profiter au mieux des nombreux avantages du bambou il faut d'abord envisager des traitements de préservation. Parmi ceux-ci nous pouvons citer le traitement "bain chaud-froid"(bambou sec) et le remplacement de la sève (bambou humide). L'immersion dans l'eau permet l'élimination de l'amidon, des sucres et d'autres extraits, tandis qu'un lavage à l'eau courante apporte de meilleurs résultats (ONU, 1972).

KUMAR et DOBRIYAL (1992) ont constaté que les pertes de masse du bambou par des attaques biologiques sont de l'ordre de 20-30% pendant 12 mois. Ils ont remarqué que la propagation d'un liquide de préservation est très rapide dans le sens de l'axe longitudinal du bambou. En revanche la propagation selon l'axe radial peut varier, en fonction du rapport entre les vaisseaux et les fibres. Le bambou est facile à traiter avec de la créosote, et moyennement avec un sel soluble dans l'eau.

Pour réaliser une protection efficace, économiquement viable, qui consomme peu de produits chimiques et qui nécessite peu de main-d'oeuvre, nous pouvons protéger uniquement les extrémités des chaumes qui sont plus sensibles aux attaques des insectes. D'autres mesures peuvent permettre l'obtention de bambous de très bonne qualité à savoir : le choix des chaumes déjà mûrs (2-4 ans) et un stockage à l'abri de l'humidité.

II.2.2.5.1 PROPRIETES PHYSIQUES DU BAMBOU

Les propriétés physiques du bambou étudiées sont: l'humidité, les variations dimensionnelles en fonction de la variation de l'humidité et la masse volumique. Normalement ces grandeurs présentent une étroite interdépendance.

a) HUMIDITE DU BAMBOU

L'humidité* du bambou fraîchement coupé est d'environ 80%. Elle varie un peu en fonction de l'âge du chaume, de la période de l'année et de la position de l'échantillon dans le chaume. Après abattage, pour obtenir une humidité de 10 à 15%, un séchage à l'air d'un ou deux mois est nécessaire. Le séchage est très important car il permet de réduire considérablement la masse, ce qui facilite le transport et permet en même temps d'augmenter les qualités mécaniques du bambou. Il est également indispensable en cas de collage ou d'un mélange avec d'autres matériaux.

Au moment du séchage du bambou, apparaissent des problèmes liés aux valeurs différentes de ses variations linéaires. Dans la plupart des observations on note la présence de fissures longitudinales, qui sont plus importantes que dans le bois, en raison de l'absence d'éléments anatomiques radiaux. L'absence partielle ou totale de noeuds dans les échantillons favorise probablement la présence de fissures.

Selon OTA (1953), cité par SCHNIEWIND (1989), le point de saturation des fibres du bambou est largement inférieur à 17%, ce qui est largement inférieur à la moyenne obtenue dans le cas de la plupart des bois.

b) VARIATIONS DIMENSIONNELLES DU BAMBOU

Les variations dimensionnelles axiales du bambou sont négligeables. En revanche, les variations radiales et tangentielles sont importantes et ont des valeurs relativement proches. Contrairement au bois, le retrait radial du bambou est plus important (SCHNIEWIND, 1989). LIESE (1987) affirme que contrairement au bois, le bambou commence à rétrécir dès le début du séchage. Le même auteur a remarqué que l'absorption de l'eau par le bambou sec est surtout due à l'hygroscopicité des extraits dans les cellules de parenchyme. GHAVAMI et HOMBECK (1981) ont trouvé, pour le bambou, une absorption moyenne de 35,5%, pour une durée de saturation

* par rapport au poids sec

de 160 heures. Ils en ont conclu que cela est un obstacle important pour son utilisation avec le béton. SMITH et coll. (1979) ont observé que les fibres de bambou peuvent absorber une masse d'eau équivalente à leur propre masse, après un période d'une heure.

LOPEZ (1978) a démontré que l'eau s'absorbait beaucoup moins si les éprouvettes provenaient de la région externe du chaume. Dans le cas d'une immersion dans de l'eau durant 7 jours, il a constaté que pour des éprouvettes prélevées dans la couche externe, l'humidité était de 3%, alors que pour la totalité du chaume elle était de 16%.

Pour les espèces *P. pubescens* et *P. reticulata* le retrait total (entre l'état humide et l'état anhydre) approche les valeurs moyennes de 6,65% (radial), 4,45% (tangential) et de 0,33% (axial), selon OTA (1955), cité par SCHNIEWIND (1989).

BERALDO et ZOULALIAN* ont présenté les résultats obtenus avec quelques espèces de bambous brésiliens, et une espèce originaire de la Bamboueraie de Prafrance (*P. viridis*). Les résultats du tableau III ont été obtenus par la méthode de mesure directe sur l'éprouvette (méthode géométrique). SHARMA (1988) a rapporté que le retrait du bambou est fonction de sa masse volumique. Cependant les données ci-dessous ne sont pas comparables, car il n'a pas été tenu compte de l'âge des éprouvettes.

Nom botanique	Masse volumique(kg/m ³)			Variations dimensionnelles(%)			
	saturé	sec à l'air	anhydre	radial	tangential	axial	volumique
<i>D. giganteus</i>	1110	790	760	5,5	6,2	0,5	12,6
<i>B.v. vittata</i>	1210	570	560	9,1	7,5	0,4	17,8
<i>B. tuldoides</i>	1100	660	650	11,7	8,9	0,4	22,2
<i>P. purpuratta</i>	1150	590	590	9,8	8,0	0,5	19,2
<i>Phyllostachys sp</i>	1080	600	580	6,9	6,7	0,6	14,8
<i>P. viridis</i>	1090	750	730	8,0	8,1	0,4	17,1

Tableau III - Caractéristiques physiques des bambous

* Voluntary paper, IUFRO, Nancy (1992)

c) MASSE VOLUMIQUE DU BAMBOU

Contrairement aux bois, la masse volumique des différents bambous ne présente pas de grands écarts. La masse volumique de bois tels que le balsa (*Ochroma lagopus*) ou le kiri (*Pawlonia* sp) est inférieure à 200 kg/m³, tandis que les essences plus denses telles que l'ébène, l'ipê (*Tabebuia* sp), et l'azobé présentent des valeurs supérieures à 1100 kg/m³. En revanche, les bambous ont une masse volumique comprise entre 600 à 1000 kg/m³, selon SCHNIEWIND (1989) ou entre 700 à 840 kg/m³ selon XUHE et KELIN (1990). La masse volumique du bambou dépend de l'échantillonnage, de l'humidité, de l'âge, etc.

II.2.2.5.2 CONSTITUTION CHIMIQUE DU BAMBOU

Les bambous ne présentent pas de différences significatives du point de vue de leur constitution chimique élémentaire vis à vis d'un bois tel que le sapin (tableau IV). Toutefois, on remarque que le taux de cendres peut varier de façon significative entre les différentes espèces de bambou.

Nom botanique	Carbone	Hydrogène	Oxygène	Cendres
<i>D. giganteus</i>	47,6	6,3	43,5	2,6
<i>B. tuldoides</i>	45,8	6,1	43,5	4,6
<i>B. vittata</i>	45,5	6,0	43,3	5,2
<i>P. viridis</i>	48,0	6,1	42,8	3,1
<i>Abies sp</i>	46,9	6,4	44,2	2,5

Tableau IV- Constitutions chimiques élémentaires du bambou et du sapin (%)

LOPEZ (1974) a présenté des résultats très intéressants sur la constitution chimique du bambou "guadua" (*Bambusa guadua*). Le tableau V montre les changements de la constitution chimique en fonction de la position dans un chaume. Les noeuds et les couches externes présentent un plus grande quantité de cendres et de silice, ce qui provoque une usure rapide des outils de coupe lors de l'usinage. Contrairement à ce qu'on attendait, les teneurs en carbohydrates sont sensiblement les mêmes, quelque soit le secteur de l'échantillonnage. On peut se poser une question sur des possibles différences entre ces constituants dénommés "carbohydrates". Sont-ils les mêmes ?

Position	Cendres	Silice	Lignine	Carbohydrates
Externe	4,33	3,18	27,06	68,88
Interne	3,52	1,54	24,06	67,27
Noeud(interne)	6,77	4,66	24,12	66,23

Tableau V - Constitution chimique du bambou *Bambusa angustifolia*(%)

(D'après LOPEZ, 1974)

Selon SCHNIEWIND (1989), la composition chimique du bambou présente des taux d'extrait alcalin, des cendres et de la silice en quantité plus importante que dans le cas des feuillus. XUHE et KELIN (1990), pour les bambous, donnent les chiffres suivants: 49 à 58% de cellulose, 20 à 33% d'hémicelluloses, 21 à 28% de lignine, et un taux de cendres compris entre 0,8 et 3,2%. De telles valeurs sont comparables avec celles obtenues par d'autres chercheurs pour quatre espèces de bambous (tableau VI).

Holocellulose	67,4	64,9	66,5	62,9
Pentosanes	22,1	14,7	21,1	19,6
Lignine	21,6	17,9	26,9	32,2
Extrait-NaOH(1%)	27,0	-	27,9	28,3
Extrait-Alcool-benzène	3,8	-	4,1	3,2
Anhydride uronique	4,7	2,4	-	-
Cendres	1,8	1,1	2,4	5,3

Tableau VI - Constitution chimique du bambou (MAEKAWA et KITAO, 1965; GOMIDE et coll., 1988; TAMOLANG et coll., (1980), cités par SCHNIEWIND, 1989)

MAEKAWA et KITAO (1965) ont effectué l'analyse des hémicelluloses d'une espèce non-spécifiée de bambou. Ils ont trouvé, que 30% de l'holocellulose du bambou correspondait aux hémicelluloses. A partir d'extractions réalisées avec de la soude, et dosées avec la solution de Fehling, ils ont établi un rapport de 1:15-16 entre l'arabinose et le xylose. L'arabinoxilane est le principal polyose obtenu par l'analyse du *P. makinoi*, selon FENGEL et SHAO (1984), qui ont trouvé un rapport entre l'arabinose et le xylose de l'ordre de 1: 17-18.

MOUGEL (1992) a effectué une comparaison entre la constitution chimique des résineux et des feuillus. Les premiers contiennent très peu de pentosanes tandis que les seconds en présentent une quantité importante. L'auteur donne des chiffres moyens pour les résineux de 45-55% (cellulose), 20-25% (hémicelluloses) et de 25-30% (lignine). Les valeurs correspondantes

dans le cas des feuillus sont, respectivement de 40-50% (cellulose), 20-35% (hémicelluloses) et de 18-23% (lignine).

IL.2.2.5.3 PROPRIETES MECANQUES DU BAMBOU

D'après SHUKLA et PRASAD (1988), SANYAL et coll. (1988), la résistance spécifique du bambou est comparable à celle obtenue avec des bois réputés tels que le "teck" (*Tectona grandis*) et le "sal" (*Shorea robusta*). Toutefois la difficulté majeure de l'étude des caractéristiques mécaniques du bambou est liée à sa forme proprement dite. On doit essayer de s'approcher des conditions identiques à celles des essais réalisés sur les éprouvettes en bois. Toutefois les chaumes de bambou présentent souvent une conicité assez importante, qui empêche l'obtention d'éprouvettes régulières. De plus, l'hétérogénéité d'une éprouvette choisie dans le même chaume peut aussi avoir un rôle très important sur les résultats des essais.

LOPEZ (1974), LIESE (1987), et SEKHAR et RAWAT (1956), cités par SANYAL et coll. (1988), ont aussi mis en évidence l'importance d'une normalisation des essais sur le bambou. Les résultats obtenus sont souvent influencés par plusieurs paramètres propres à chaque espèce, tels que le rapport entre ses dimensions caractéristiques, l'échantillonnage, la provenance, et surtout l'âge du chaume.

ZHOU (1981), cité par LIESE (1987) a trouvé que les résistances à la compression et à la traction du bambou augmentent pendant 6 ans, tandis que les échantillons âgés de 8 ans sont plus résistants à la flexion. LIESE (1987) a aussi observé l'importance de corrélérer la résistance mécanique à l'anatomie du bambou. Il a trouvé que le module d'élasticité (MOE) et la contrainte de rupture (MOR) sont fortement corrélés à la longueur des fibres. La distribution d'une façon plus homogène des faisceaux vasculaires favorise le fendage du chaume.

a) ESSAI DE L'ECRASEMENT DU BAMBOU

L'échantillonnage pour des essais n'est pas une tâche facile. Les espèces de plus grand diamètre externe, et dont les parois sont généralement plus épaisses, permettent l'obtention d'éprouvettes parallélépipédiques, par une coupe à la scie suivie d'un rabotage. En revanche, dans le cas de bambous de petit diamètre il est impossible d'obtenir des éprouvettes semblables, on les utilise donc entiers, pour les

essais. Dans ce cas, la présence ou l'absence de noeuds, leur nombre et leur position dans le chaume peuvent fortement influencer les résultats.

Les bambous de grand diamètre permettent d'obtenir des éprouvettes de petite taille, ce qui rend les essais plus précis, tout en évitant les probables glissements de l'éprouvette entre les plateaux de la machine d'essais, principalement si les échantillons présentent des hauteurs importantes. En utilisant directement les chaumes de bambous, on peut atteindre des charges de rupture de l'ordre de 20 à 40 tonnes. La plupart des machines d'essais ne disposent pas d'une telle capacité.

Selon LOPEZ (1974) la présence de noeuds a une influence importante sur l'écrasement des éprouvettes parallélépipédiques. La résistance moyenne des échantillons cylindriques est toujours supérieure à celle obtenue sur une éprouvette élaborée; ceci est dû principalement à la plus grande résistance transversale des noeuds.

La déformation des éprouvettes est différente, selon que le capteur est proche de la couche extérieure ou d'un noeud. La couche extérieure se déforme moins que la couche intérieure, en raison de ses caractéristiques anatomiques différentes. Le module d'élasticité ainsi obtenu peut être 2 à 3 fois plus élevé si on utilise des éprouvettes constituées d'une plus grande proportion de tissus proches des couches extérieures.

DATTA (1935), cité par LOPEZ (1974), a été un des premiers à faire des études sur la résistance du bambou. Pour des échantillons d'une hauteur de 30 cm et d'un diamètre de 3 cm, il a trouvé une contrainte de rupture à la compression d'environ 80 MPa, et un MOE d'environ 20000 MPa. Il en a conclu que le bambou pourrait bien renforcer le béton dans les ouvrages secondaires.

A la suite d'une étude réalisée au Brésil sur le renforcement du béton avec du bambou, nous avons en 1986, étudié le comportement à l'écrasement de certaines espèces de bambou. Pour le *Phyllostachys* sp de dimension moyenne de 43 mm (diamètre externe) et 34 mm (diamètre interne) la résistance à l'écrasement est de 55 MPa. Les éprouvettes de *D. giganteus* testées sous la forme de parallélépipède ont présenté une résistance moyenne de 93 MPa. Les essais sur le *P. purpuratta* de dimension moyenne de 22 mm (diamètre externe), 10 mm (diamètre interne) et de distance entre les deux noeuds de 120 mm, ont donné une résistance moyenne de 65 MPa. La résistance des éprouvettes possédant

trois noeuds était de 10% supérieure à celle des éprouvettes ne présentant que deux noeuds.

Selon JANSEN (1981), cité par SCHNIEWIND, (1989), le bambou à l'exemple du bois, présente une étroite dépendance entre ses propriétés mécaniques et sa masse volumique. La résistance à l'écrasement (en MPa) est considérée comme étant égale au produit de la masse volumique (en kg/m^3) et d'un facteur égal à 0,094. De plus, la résistance est fortement dépendante de la proportion de fibres provenant de la section transversale du chaume.

b) TRACTION PARALLELE AUX FIBRES

Les anciens ponts asiatiques étaient construits avec des fibres tressées provenant de la couche externe du bambou. Ces ponts sont l'exemple d'une combinaison de légèreté et d'une excellente résistance mécanique à la traction. Leur longévité est due à l'absence de tissus internes du bambou, qui ont une teneur en sucres très importante, et sont donc plus sensibles aux attaques des insectes (LOPEZ, 1974).

Théoriquement le comportement du bambou à la traction parallèle peut présenter des valeurs de l'ordre de 260 MPa (ONU, 1972), principalement quand les essais sont faits sur des éprouvettes qui ont été choisies dans la partie externe. La résistance à la traction est de 2,5 à 3,5 fois plus importante que celle obtenue à l'écrasement (SCHNIEWIND, 1989).

La mise au point de l'essai de traction est particulièrement délicate. La seule présence des mâchoires de la machine peut provoquer la rupture des éprouvettes. Pour réaliser des essais dans de bonnes conditions il est indispensable, d'une part d'utiliser des éprouvettes de faible dimensions provenant de la partie centrale (comme pour le bois), d'autre part de les protéger des mâchoires en intercalant des pièces en caoutchouc, de la résine, ou des plaques d'aluminium (GHAVAMI, 1988).

Si on utilise des espèces de grand diamètre (*D. giganteus*) on peut facilement obtenir des éprouvettes de forme parallélépipédique. En revanche, dans le cas d'espèce de faible diamètre cela n'est pas possible. Il faut protéger la forme courbe des extrémités en y incluant du ciment ou de la résine pour obtenir une forme susceptible d'être serrée par les mâchoires.

La résistance des éprouvettes ne dépend pas de la zone du chaume échantillonnée (GHAVAMI et HOMBECK, 1981). Toutefois, LOPEZ (1974)

prétend que la présence des noeuds réduit sensiblement la résistance à la traction.

c) FLEXION STATIQUE

L'une des alternatives que l'on peut adopter pour l'étude du comportement du bambou à la traction parallèle, est d'obtenir les résultats à partir d'essais de flexion statique, plus faciles à réaliser. Une telle procédure est souvent adoptée dans le cas du bois.

Les espèces possédant les plus grands diamètres permettent de fabriquer les mêmes éprouvettes que pour le bois. La disposition de la face externe sur la machine d'essai peut avoir une grande importance sur les résultats obtenus. On peut s'attendre à des valeurs plus élevées si les essais sont réalisés lorsque la couche externe est à l'opposé du cylindre de charge. Cette hypothèse est liée à l'inhomogénéité de l'éprouvette. Toutefois, à la suite d'essais effectués sur le *D. giganteus*, nous avons constaté des résultats contradictoires. Il est possible que, cette contradiction, provienne de la faible distance entre les appuis (15 cm) ou d'une trop faible résistance de la couche interne à l'écrasement. Dans un rapport de l'ONU (1972), on avait constaté le même phénomène. LOPEZ (1974), malgré de nombreux essais n'a pu confirmer le rôle de la position de la couche externe.

Pour les bambous cylindriques de petits diamètres, on peut théoriquement calculer les résultats en supposant que les éprouvettes sont comme des tubes avec une paroi homogène. Cependant, les chaumes de bambou sont de différentes épaisseurs, principalement aux voisinages des noeuds. Dans ce secteur on trouve souvent une augmentation de l'épaisseur de la paroi, et un changement de la direction des fibres.

L'écart entre les noeuds peut avoir une distance variable sur une même espèce ou sur des espèces différentes. Il est de ce fait particulièrement difficile de comparer les résultats.

Les résultats que nous avons publié précédemment sur des bambous brésiliens sont représentés dans le tableau VII. On peut remarquer que les valeurs rapportées sont du même ordre que celles obtenues sur des bois à bon module d'élasticité.

Nom botanique	Limite élastique	Contrainte de rupture	Module d'élasticité
<i>B. tuldoides</i>	95	153	19600
<i>B. vulgaris</i>	48	106	8000
<i>B.v. vittata</i>	40	75	5000
<i>D. giganteus</i>	86	151	12000
<i>P. purpuratta</i>	42	69	8000

Tableau VII - Flexion statique du bambou (en MPa), d'après BERALDO (1987).

II.2.2.5.4 CHOIX DES ESPECES DE BAMBOU

L'ensemble des résultats des essais mécaniques effectués sur les bambous, ne permettent pas de distinguer qu'elle est la meilleure espèce utilisable dans la construction.

Pour aboutir à une construction en bambous de qualité acceptable, il faut tout d'abord choisir les chaumes mûrs, et bien les protéger contre l'attaque des champignons et d'insectes. Dans la littérature, on trouve de nombreux renseignements pour l'amélioration de la qualité et de la durée de vie des bambous. Tous les auteurs sont unanimes pour reconnaître que la réduction de la quantité d'amidon permet de minimiser leur détérioration.

II.2.2.5.5 BAMBOU TRANSFORME

A l'exemple du bois, on peut penser que l'utilisation du bambou sous forme de particules, dans la fabrication de matériaux reconstitués permettra d'éliminer les inconvénients dus à son hétérogénéité et en même temps d'optimiser les traitements de préservation. Par la suite, on peut envisager l'utilisation de cette matière première, souvent disponible et très bon marché dans les pays tropicaux.

Les propriétés du bambou et son aspect esthétique peuvent être améliorés par des techniques modernes. Selon LIESE (1987), on peut fabriquer du lamellé-collé avec du bambou ("lamboo"). JIAN et MING (1992) affirment que l'utilisation de 10% de la production annuelle des bambous de la région d'Yunnan suffirait à couvrir les besoins des usines du secteur sur la fabrication de panneaux de particules et de pâte à papier. De plus, ils ont proposé l'utilisation du bambou dans la fabrication de contreplaqué ("bamboo-woven"). Dans ce cas il serait nécessaire d'éliminer les couches internes et externes, car elles sont réfractaires aux adhésifs.

Les particules de bambou sont utilisées dans la fabrication de panneaux de particules avec des résines, telles que l'urée-formol (XUHE et KELIN, 1990) ou la phénol-formaldéhyde (SCHNIEWIND, 1989). A l'exemple des panneaux fabriqués avec du bois, ceux fabriqués avec du bambou présentent de propriétés physico-mécaniques différentes selon la technologie de fabrication.

SINGH et JOSHI (1988) ont proposé la substitution partielle de la résine synthétique phénolique, par 50% de liqueur noire obtenue à partir du bambou. ROWELL et NORIMOTO (1988) ont effectué l'acétylation des particules de bambou. Les panneaux ainsi obtenus avec la résine phénol-formaldéhyde ont une bonne stabilité dimensionnelle. SHUKLA et PRASAD (1988) ont fabriqué un composite à partir de plusieurs planchettes rabotées de bambou, qu'ils ont ensuite collées avec une résine. Ils ont obtenu des éléments d'utilisation plus rationnelle que le bambou lui même à cause de sa géométrie.

II.3 LA MATRICE CIMENT

Ciment: liant hydraulique, formé de constituants anhydres, cristallisés (clinker) ou vitreux, (laitier ou pouzzolane) renfermant essentiellement de la silice, de l'alumine et de la chaux, et dont le durcissement est principalement dû à la formation par combinaison de ces constituants anhydres avec de l'eau, de silicates et d'aluminates de calcium hydratés très peu solubles dans l'eau (AFNOR, 1981, P 15-301).

Pour les ciments inorganiques on utilise souvent le terme *ciment* pour désigner le ciment Portland artificiel (CPA), ou le ciment Portland composé (CPJ), qui sont les principaux liants minéraux commercialisés en France (85% du marché).

Le ciment acquiert sa résistance grâce à des réactions chimiques qui permettent d'établir de très fortes liaisons entre ses constituants. Le ciment est un liant hydraulique, car il réagit avec l'eau tout au long des phénomènes de prise et de durcissement (DORLOT et coll., 1986). Le tableau VIII présente les principaux types de ciment commercialisés en France.

DENOMINATION	SIGLE	RESISTANCE 28 J (MPa)
Portland sans constituants secondaires	CPA	25-50
Portland avec constituants secondaires	CPAL, CPAC, CPALC	25-40
Portland de fer	CPF	25-32,5
Métallurgiques mixtes	CMM	25-32,5
Haut fourneau	CHF	25-32,5
Laitier au clinker	CLK	25-32,5
Sur sulfatés	CSS	32,5-40
Laitier à la chaux	CLX	10-16
A maçonner	CM	16-25
Naturel	CN	16
Chaux hydratée naturelle	XHN	3-10
Chaux hydratée artificielle	XHA	6-10

Tableau VIII - Types de ciments (Formulaires Pont-à-Mousson S.A., 1975)

La norme NF P 15-301 définit les classes et éventuelles sous-classes de résistance des ciments. Les résistances (en MPa) sont obtenues en essais de compression réalisés à 28 jours, ou éventuellement à 2 jours. Les classes les plus courantes correspondent à des résistances à 28 jours de 35, 45 et 55 MPa (on admet une tolérance de + 10 MPa). Il faut ajouter les ciments à hautes performances (H.P.), ainsi que les ciments modifiés à prise rapide (R).

II.3.1 CONSTITUANTS DU CIMENT

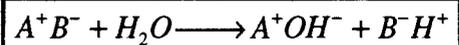
Les principaux constituants du ciment Portland sont le silicate dicalcique ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - noté **C₂S**), le silicate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - noté **C₃S**), l'aluminate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - noté **C₃A**) et l'alumino-ferrite tétracalcique ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ - noté **C₄AF**). Le **C₃S** avec une proportion comprise entre 45 et 70%, est le principal constituant du ciment, suivi par le **C₂S** (15-35%). Le **C₃A** peut présenter une très grande variation entre 0 et 15%, tandis que le **C₄AF** varie entre 3 et 15% (DUTRUEL et GUYADER, 1975).

Le **C₂S** (sous forme β -bélite) est le responsable de la résistance à long terme. Le **C₃S** (alite) est responsable de la résistance initiale. Le **C₃A** et le **C₄AF** (célite) n'ont pas d'influence significative sur les caractéristiques

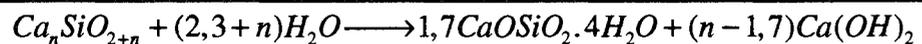
mécaniques des composites à base de ciment (AVRAM et coll., 1981). Il faut également noter la présence de chaux libre (CaO - noté C, entre 0,5 et 2,2%), et une faible quantité d'autres produits (Na₂O, K₂O, MgO).

II.3.2 REACTIONS D'HYDRATATION DU CIMENT

L'hydratation est la coupure de la liaison ionique d'un composant sous l'action de la molécule polaire de l'eau, qui affaiblit cette liaison. Selon AVRAM et coll.(1981), les réactions d'hydratation peuvent être exprimées par la stoechiométrie:

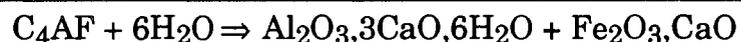
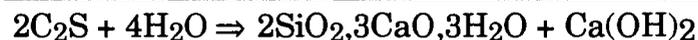
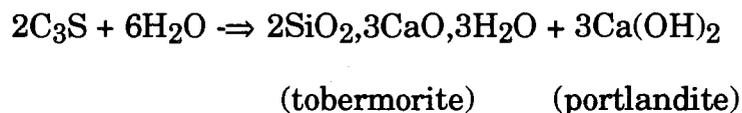
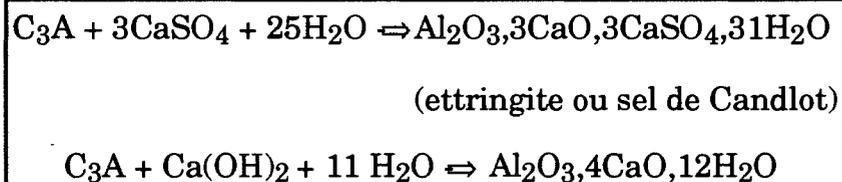


YOUNG (1993) a présenté les réactions d'hydratation sous la forme générique:



où n = 2 ou 3

Les réactions chimiques très complexes, peuvent être représentées, selon LIMOSIN (1981), par les stoechiométries suivantes :



On peut noter la production importante de chaux (portlandite). Selon VENUAT (1978), la tobermorite est à l'origine de la résistance du ciment, de même que la portlandite, mais dans une proportion nettement plus faible. Le C_3A occasionne un dégagement d'une grande quantité de chaleur (86,4 Kcal/par kg), et l'addition de gypse ralentit la réaction d'hydratation. Le C_3S et le C_4AF libèrent respectivement 54,7 Kcal/kg et 48,6 Kcal/Kg (CATHARIN, 1978 a).

II.3.3 PRISE ET DURCISSEMENT DU CIMENT

La pâte de ciment conserve après mélange avec l'eau (opération de gâchage) et durant un temps variable, une certaine plasticité. Les grains de ciment sont mouillés et dispersés dans l'eau; la pâte a une consistance visqueuse, ce qui permet de la mettre en place (DORLOT et coll., 1986). Ensuite, on observe un certain ralentissement dû à la formation d'un film étanche autour des grains de ciment (période de dormance). La température est presque constante, car l'eau doit diffuser à travers ce film, pour réagir avec les constituants du ciment qui ne sont pas encore hydratés. Les produits résultant de l'hydrolyse doivent également diffuser vers la surface (RADUANY, 1974; LIMOSIN, 1981). L'apparition de microfissures dans la région de l'interface entre le film et les grains non-hydratés entraîne le passage de l'eau, et la réaction se poursuit. Ce phénomène provoque une élévation de la température de la pâte, c'est le début de la prise. Après un certain temps la pâte n'est plus déformable, c'est la fin de la prise qui coïncide avec le maximum de la température. Les interactions entre l'eau et les granulats non-hydratés se poursuivent avec le temps, c'est le durcissement (VENUAT, 1978).

Les temps de début de la prise du ciment, ainsi que sa durée, sont très variables et dépendent de plusieurs facteurs, tels que la teneur en C_3A du ciment, la surface spécifique du ciment, le rapport eau/ciment, les conditions climatiques (surtout la température), la présence d'adjuvants solubles. La méthode normalisée pour la détermination du temps de prise, est celle de l'aiguille de Vicat. Toutefois, la variation de la température (courbe d'hydratation), de la conductance électrique (RADUANY, 1974), de la vitesse de propagation d'une onde sonore en fonction du temps, permettent également d'obtenir ces informations.

Le ciment durci est un système microhétérogène du point de vue physique et chimique avec une structure microporeuse et microfissurée

(LIMOSIN, 1981). Selon AVRAM et coll., (1981), à la fin de l'hydratation la structure du ciment est composée de différentes phases:

- les particules de ciment non-hydratées
- une matrice continue de gel de ciment en cours de séchage et de cristallisation
- une certaine quantité de vides ou pores capillaires, partiellement remplis d'eau, dont le pourcentage volumique est fonction de l'évolution du séchage.

II.3.4 MORTIERS ET BETONS

De par sa cohésion et sa résistance, le ciment durci (pâte) peut être utilisé seul. Selon DORLOT et coll.(1986), pour des raisons économiques, on y associe une certaine quantité de sable (mortier), ou en addition avec des granulats de plus grande dimension (béton). VENUAT (1978) parle de mortier ou "micro-béton" lorsque les dimensions des granulats sont inférieures à 6 mm. Une étude du Ministère de L'Urbanisme et du Logement présente un "béton de sable", dont le dosage en ciment est réduit par rapport à celui d'un mortier classique.

D'une manière générale on peut classer les différents produits à base de ciment en fonction de leurs rapports massiques (ou volumiques) des constituants. En utilisant les rapports "**ciment/sable/gravier/eau**", on peut représenter la pâte par 1/0/0/0,25; le mortier par 1/3/0/0,5 et le béton par 1/2/3/0,5. Toutefois l'action des adjuvants peut modifier considérablement les rapports massiques.

Dans le béton, les agrégats inertes représentent 80% du volume et ils permettent une réduction assez importante du coût final. De plus, ils réduisent le retrait du béton, et dissipent la chaleur pendant son durcissement (AVRAM et coll., 1981). Le tableau IX représente les modifications des propriétés mécaniques du ciment lors de l'addition de sable et d'autres granulats (DORLOT et coll., 1986).

Addition	Volume(%)	Traction	Flexion	Compression	Module d'Young
aucune	0	7,0	13	52	20000
sable	50	5,5	10	50	30000
granulat	50	3,5	7	50	50000

Tableau IX - Propriétés mécaniques du ciment, du mortier et du béton (MPa) (D'après DORLOT et coll., 1986)

Ces données sont importantes pour comprendre les modifications dues au remplacement du ciment par des agrégats inertes. La résistance à la compression n'est pas altérée, tandis que le module d'Young croît considérablement, au fur et à mesure que l'on remplace le ciment par un mélange de sable et de granulats dont les dimensions sont plus importantes. En revanche les résistances à la traction et en flexion sont réduites de 20% pour le mortier et de 50% pour le béton. Pour pallier à cette faiblesse du béton on ajoute des tiges d'acier, et on obtient ainsi le béton armé. On peut envisager une amélioration du béton classique ou d'un mortier, aux efforts de traction et de flexion, par l'ajout de plusieurs types de "fibres" d'origine naturelles ou artificielles.

II.3.4.1 CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un matériau composite constitué d'un mélange comprenant un liant (ciment), de l'eau, des agrégats (sable, gravier), et souvent d'autres produits appelés adjuvants. La qualité d'un béton est fort dépendante des caractéristiques propres de ses constituants, de leurs proportions, des conditions opératoires de fabrication, des conditions d'environnement, mais surtout d'un paramètre important qui est l'âge de l'éprouvette. Dans ce que suit nous rappelons l'influence des différents constituants sur les caractéristiques du béton.

II.3.4.1.1 CIMENT

Les caractéristiques physicomécaniques des bétons dépendent du dosage du ciment (kg/m^3 de béton). Les dosages normalement utilisés selon le type d'ouvrage se situent entre 150 et 450 kg/m^3 de béton. Ils dépendent des caractéristiques des granulats (forme et granulométrie), ainsi que du type d'ouvrage (préfabrication, béton armé, ouvrages massifs, etc.). Il existe un certain nombre de formules permettant d'évaluer la résistance d'un béton à la compression (VENUAT, 1978).

II.3.4.1.2 EAU

La masse d'eau minimale représente 25% de celle du ciment. Toutefois pour l'ouvrabilité du béton on ajoute environ entre 140 et 200 l d'eau/m³, ce qui représente un rapport masse d'eau/masse de ciment (E/C) compris entre 0,4 et 0,6. Il y a un compromis raisonnable à déterminer entre la résistance et la plasticité (ADAM et coll., 1984). La plasticité du béton est évaluée par des essais d'affaissement (cône d'Abrams ou "slump test"), ou par l'essai de la table vibrante ("flow test").

AVRAM et coll. (1981) ont présenté une formule qui donne la quantité d'eau nécessaire (EN) en l/m³, à partir des dosages (en kg/m³) de ciment (C) et de granulats fins (F), moyens (M) et grossiers (G):

$$EN = 0,23 * C + 0,18 * F + 0,07 * M + 0,02 * G$$

L'analyse des composants de la formule ci-dessus montre nettement que les constituants les plus fins (C et F) sont ceux qui demandent le plus d'eau (80% du total).

De même qu'un excès d'eau, un manque d'eau provoque des modifications du béton, comme la formation de "nids" de cailloux, et une augmentation du pourcentage de vide. En revanche, un excès favorise les hétérogénéités, la ségrégation et le ressuage. On obtient des bétons qui ont une résistance mécanique réduite (VENUAT, 1984).

Selon DREUX (1986), la formule de Bolomey permet de prévoir la résistance d'un béton âgé de 28 jours (f_{c28}), tout en prenant en compte le rapport ciment/eau (C/E), la classe de résistance du ciment (R_c), et un coefficient granulaire (G) compris entre 0,25 et 0,45:

$$f_{c28} = G * R_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Selon CATHARIN (1978 a) le rapport minimal eau/ciment pour la fabrication du béton est compris entre 0,44 à 0,50. L'augmentation de ce rapport diminue les résistances de compression initiale et après durcissement.

IL.3.4.1.3 AGREGATS

La distribution des particules du ciment et des agrégats a un rôle essentiel sur les propriétés et les caractéristiques des produits à base de ciment (ROY et coll., 1993). Les agrégats normalement utilisés dans le béton sont d'origine minérale, naturelle (roulés ou concassés) ou artificielle (schiste expansé, argile expansé, etc.). Il est préférable qu'ils soient de forme cubique ou sphérique, plutôt qu'aplatis ou feuilletés. De plus, ils interviennent par leur origine (basalte, calcaire, granit, etc.), et leurs caractéristiques chimiques (VENUAT, 1978).

Un choix correct des agrégats, avec des granulométries différentes, permet de réduire la consommation de ciment (DORLOT et coll., 1986). En effet, si on imagine les agrégats présents de forme sphérique, et de diamètre identique, si la granulométrie est uniforme, la porosité est indépendante de la dimension des particules.

L'étude du Ministère de L'Urbanisme et du Logement a montré que l'on pourrait augmenter la compacité naturelle du sable, par l'addition d'un filler (calcaire). L'addition de filler permet de créer une granulométrie continue entre zéro et les plus gros grains de sable. Le béton de sable ainsi obtenu a des propriétés intéressantes, surtout au niveau de la faiblesse du retrait.

De même, LIMOSIN (1981) a affirmé que les sables qui présentent un minimum de pores sont constitués de 2/3 de gros grains, et de 1/3 de grains fins. Ces rapports sont normalement utilisés dans la fabrication des bétons classiques.

IL.3.4.1.4 ADJUVANTS

Les adjuvants sont des produits que l'on utilise actuellement d'une façon systématique, en faible quantité, pour améliorer les qualités du béton à l'état frais ou à l'état durci. Selon VENUAT (1978, 1984) et DORLOT et coll. (1986), on peut classer les adjuvants de la façon suivante:

- a. **les fluidifiants** - ils permettent de réduire l'eau de gâchage, et donc d'améliorer les qualités du béton, tout en conservant les mêmes quantités des autres constituants.
- b. **les plastifiants (ou réducteurs de l'air)** - ils améliorent la plasticité, la stabilité et l'homogénéité du béton. Les bétons

présentent de meilleures propriétés mécaniques, et une meilleure conservation. Contrairement aux bulles d'air normalement présentes au moment du malaxage (plus de 300 μm), l'air alors entraîné (moins de 100 μm) améliore la résistance du béton aux cycles gel-dégel.

- c. les accélérateurs** - ils agissent chimiquement sur les constituants du ciment (C_3A et C_3S), tout en permettant une modification des caractéristiques des réactions d'hydratation. Ils sont constitués de chlorures ou d'autres sels alcalins terreux. Toutefois leur présence (par exemple CaCl_2) favorise la corrosion de l'acier des armatures du béton armé.
- d. les retardateurs** - comme les accélérateurs ils agissent sur l'hydratation du ciment, tout en prolongeant le temps de prise du béton. Ils sont surtout constitués de sucres, de lignosulfates, de gluconates, etc.
- e. les hydrofuges** - ils réduisent la pénétration de l'eau dans le béton en créant des forces de tension superficielles.
- f. les autres produits** - on peut citer, les entraîneurs d'air (par exemple le sang), les anti-gels, les produits de décoffrage, les durcisseurs de surface, les produits de cure, etc.

II.3.5 PROPRIETES PHYSIQUES DU BETON

Les propriétés physiques mesurées pour les différents bétons sont: la masse volumique, les variations dimensionnelles (retrait et gonflement) et les propriétés liées à l'isolation phonique ou thermique.

II.3.5.1 MASSE VOLUMIQUE (MV)

La masse volumique des bétons ordinaires secs à l'air est de l'ordre de 2300 kg/m^3 . Ce chiffre dépend, de la nature des différents agrégats et des rapports employés, ainsi que du mode de moulage utilisé (ADAM et coll., 1984). Toutefois, il existe des bétons dont les masses volumiques sont comprises entre 150 et 800 kg/m^3 . Parmi ces bétons dit légers, on peut citer: le béton caverneux, le béton cellulaire, le béton de fibres.

II.3.5.2 VARIATIONS DIMENSIONNELLES

Selon VENUAT (1978), les variations dimensionnelles des bétons sont dues, à différents phénomènes d'absorption et de reprise d'eau (retrait et gonflement hydraulique), ou à des altérations dues à la température (retrait thermique), ou sous une charge (fluage). Leurs actions isolées ou cumulées peuvent provoquer l'apparition de fissures, car le béton a une faible résistance à la traction (environ 1/10 de sa résistance à la compression). Les retraits hydrauliques, souvent les plus importants, sont dus au départ de l'eau:

- a. retrait avant prise** - il s'agit du départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, par évaporation ou absorption des coffrages. Il est plus important pour des éléments ayant un grand rapport surface/volume.
- b. retrait après prise** - il s'agit du départ lent de l'eau en atmosphère à faible taux d'humidité. Il dépend de certains paramètres tels que, la granulométrie du ciment, le volume occupé par la pâte, l'humidité relative et la température de l'environnement, les caractéristiques des granulats, la géométrie de l'éprouvette, etc. Une partie du retrait est réversible, l'autre est irréversible (AVRAM et coll., 1981).

On peut réduire la quantité d'eau, ou sa vitesse d'évaporation, soit par un facteur eau/ciment bien choisi, soit par des techniques appropriées d'essorage (vide, centrifugation, ou vibration et pressage), ou de cure (humidification, autoclave).

II.3.5.2.1 RETRAIT

Le retrait est un phénomène de raccourcissement dû principalement au départ de l'eau interne libre (ADAM et coll., 1984). Au cours du séchage du béton les retraits sont relatifs au départ de l'eau qui se présente sous forme capillaire, adsorbée en surface des cristaux, adsorbée intercrystalline, et d'eau intracrystalline ou zéolithique (AVRAM et coll., 1981). Selon ces auteurs, si l'humidité relative est comprise entre 50 et 99%, il y a évaporation de l'eau présente dans les pores, ce qui entraîne des phénomènes de retrait réversibles, tandis que l'humidité relative au dessous

de 45% provoque l'élimination progressive de l'eau adsorbée intercrystalline, et a comme conséquence l'apparition du phénomène de retrait irréversible.

VENUAT (1978) a mesuré les retraits d'un mortier (0/2 mm)* et des bétons (0/10 mm et 0/100 mm), après un an dans des conditions normalisées (20°C et 50% HR). Il a trouvé pour le mortier une valeur de 0,8 mm/m, et pour les bétons, des valeurs de 0,5 mm/m et 0,25 mm/m. On peut en déduire que les retraits sont plus importants au fur et à mesure que l'on réduit la taille du granulats. Le retrait devient pratiquement constant au delà d'une durée d'exposition à l'ambiance supérieure à 90 jours.

Le **retrait** est la réduction des dimensions du béton conservé à l'air ou à l'étuve, tandis que le phénomène inverse, c'est-à-dire l'augmentation des dimensions du béton immergé dans l'eau ou placé en atmosphère humide, est appelé **gonflement**. Le retrait et le gonflement qui se développent au cours du temps, présentent une amplitude initiale plus importante, et ont tendance à se stabiliser. Le gonflement d'un mortier ou d'un béton est très proche et toujours inférieur à celui d'une pâte de ciment (AVRAM et coll., 1981), alors que le retrait est très différent. Le retrait de la pâte de ciment est de l'ordre de 2 à 3 mm/m, tandis que celui d'un béton se situe entre 0,3 et 0,8 mm/m.

Le retrait du béton est beaucoup plus important que le gonflement. Tout d'abord les recherches visaient à éliminer les problèmes posés par le retrait du béton. Apparemment, le béton convient mieux aux endroits humides que pour les endroits trop secs. Le gonflement provoque l'apparition de forces de compression, tandis que le retrait provoque des forces de traction. Or, il est connu que le béton est beaucoup plus résistant en compression qu'en traction. L'apparition de forces de compression, en général favorise le comportement structural du béton (AVRAM et coll., 1981).

II.3.5.2.2 GONFLEMENT

Les valeurs du gonflement sont nettement inférieures à celles du retrait. Dans le cas d'un mortier, le gonflement après 28 jours est limité à 0,25 mm/m, tandis que le retrait est de 0,80 mm/m. Ces valeurs correspondent à 1/3 et 1/2 des valeurs obtenues dans le cas d'une pâte

* Dimensions comprises entre 0 et 2 mm

(VENUAT, 1978). On peut évaluer l'intérêt économique et technologique du remplacement d'une partie du ciment par des granulats inertes.

II.3.5.2.3 ESSAIS DE VARIATIONS DIMENSIONNELLES

Les essais de retrait et de gonflement sont réalisés sur des éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées soit à l'air à 50% d'humidité relative et 20°C (retrait), soit dans de l'eau à 20°C (gonflement). On réalise ces essais sur des éprouvettes en pâte de ciment, ou en mortier, tout en suivant les variations dimensionnelles en fonction du temps (VENUAT, 1978).

La norme NF P 14-306 (béton cellulaire) utilise pour l'évaluation du comportement de produits à base de ciment vis-à-vis des variations d'humidité, la formule :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{L_{4S} - L_{21E}}{L_{21E}}$$

où:

L_{4S} = dimension de l'éprouvette après une saturation de 4 jours dans l'eau

L_{21E} = dimension de l'éprouvette après un séchage de 21 jours

Dans le cas de blocs de béton de granulats légers, on utilise une enceinte à température constante (33°C), qui dispose d'un système de ventilation (mais qui n'a pas de contrôle d'humidité relative). Les éprouvettes (au nombre de six) sont divisées en deux catégories : les éprouvettes pour l'essai de gonflement et les éprouvettes pour l'essai de retrait (NF P 14-304).

L'amplitude du retrait ($\Delta L_R/L_R$) et du gonflement ($\Delta L_S/L_S$) est donnée par:

$$\frac{\Delta L_R}{L_R} = \frac{L_{0E} - L_{21E}}{L_{0E}}$$

$$\frac{\Delta L_S}{L_S} = \frac{L_{4S} - L_{0S}}{L_{0S}}$$

où:

L_{0E} = dimension initiale de l'éprouvette avant le retrait

L_{0S} = dimension initiale de l'éprouvette avant le gonflement

L'amplitude de la variation dimensionnelle entre les états conventionnels extrêmes ($\Delta L_T/L_T$) de l'éprouvette est donnée par l'addition

des deux valeurs obtenues par les formules précédentes. Le calcul du retrait fait apparaître une différence entre "l'état initial et l'état final", alors que le gonflement est égal à la différence entre "l'état final et l'état initial". Avec ces définitions pour un état initial intermédiaire, le retrait et le gonflement en l'absence d'évolution sont deux nombres positifs.

AVRAM et coll. (1981) ont observé que les retraits mesurés à partir des extrémités d'une éprouvette sont différents de ceux mesurés sur les surfaces latérales, principalement dans le cas d'éprouvettes de grande longueur. Les conditions des essais sont légèrement différentes de celles de la norme française, car la température est de 20°C, et l'humidité relative est de 60%. La mesure des éprouvettes (100 x 100 x 550 mm) est réalisée après 7, 28, 56 jours, et parfois 112 et 224 jours. Le retrait est calculé par le quotient des variations dimensionnelles de l'éprouvette après 7 jours et à un temps "t", et sur une longueur de 550 mm. Selon les mêmes auteurs, une méthode rapide est utilisée en Angleterre, pour provoquer le retrait. L'éprouvette est placée dans une enceinte à 50°C, dont l'humidité relative de 17% est obtenue par la présence de 20 cm³ de CaCl₂ par m³. Le temps de séchage est compris entre 6 et 8 jours. Ils proposent une autre méthode rapide pour obtenir un retrait, en plaçant l'éprouvette dans une enceinte ventilée pendant 48 heures, à une température comprise entre 122-131°C.

Le gonflement du béton étant négligeable en comparaison du retrait, les normes techniques établissent en général des valeurs maximales seulement dans le cas du retrait. En Allemagne, dans la norme DIN 1045 le retrait final doit être inférieur à 0,40 mm/m pour un béton placé dans un milieu sec (40% d'humidité relative). En France, le retrait maximal admis est donné en fonction de l'environnement: 0,15 mm/m (milieu humide) et 0,40 mm/m (climat désertique), selon AVRAM et coll. (1981).

II.3.5.2.4. FACTEURS AGISSANT SUR LE RETRAIT ET LE GONFLEMENT DU BETON

A. La nature du ciment: elle intervient en fonction de sa constitution minéralogique et de sa granulométrie. Le retrait et le gonflement augmentent avec la teneur en C₂S du ciment (AVRAM et coll., 1981). Ces auteurs ont rapporté dans leur travail, que CARLSON (1939) avait conclu que la teneur en C₃A favorisait le retrait, tandis que GRAF (1960), avait affirmé que le choix d'un ciment alumineux permettait à la fois la réduction du retrait et du gonflement.

B. La quantité de ciment: contrairement à ce que l'on peut attendre, l'augmentation de la teneur en ciment (le facteur eau/ciment étant constant) ne conduit pas forcément à une meilleure stabilité dimensionnelle du béton. Le retrait augmente avec la teneur en ciment.

C. Le rapport eau/ciment: le retrait augmente avec le rapport eau/ciment (le dosage étant constant). Au fur et à mesure que le rapport eau/ciment augmente il y a formation d'un plus grand nombre de pores, qui est provoqué par l'évaporation de l'eau.

D. Le rapport agrégat/ciment: la substitution d'une partie du ciment par des agrégats compacts permet la réduction du retrait et du gonflement. Toutefois il est intéressant de choisir un bon compromis, car on modifie également les autres propriétés du béton, surtout sa résistance. Les retraits sont très réduits par rapport à ceux de la pâte de ciment (figure 7).

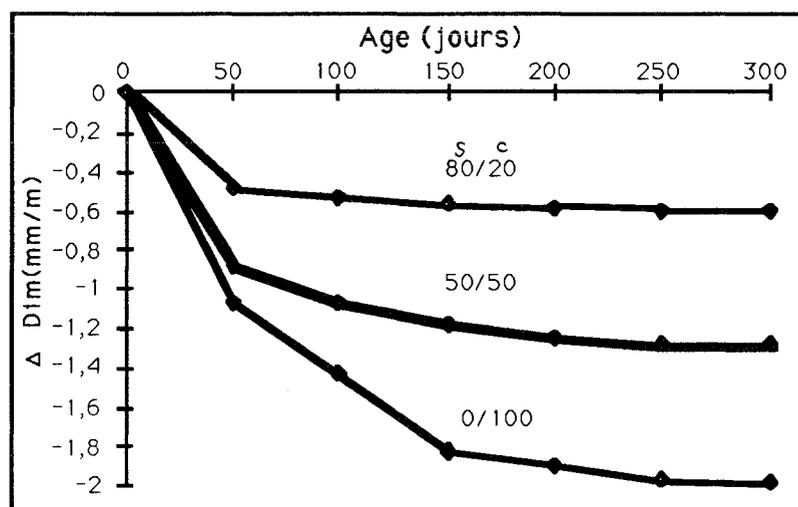


Figure 7 - L'effet du rapport sable/ciment sur le retrait du béton en fonction du temps
(D'après AVRAM et coll., 1981)

E. La granulométrie de l'agrégat: elle a une influence importante sur le retrait. Au fur et à mesure qu'on utilise des agrégats de dimensions plus réduites (et donc d'une surface spécifique plus grande), il est nécessaire d'ajouter de l'eau, de manière à assurer une bonne ouvrabilité. On connaît l'influence néfaste d'une quantité d'eau trop élevée sur le béton.

F. Les propriétés physiques de l'agrégat: les agrégats d'un faible module d'élasticité entraînent une augmentation considérable du retrait et du gonflement, car ils ne peuvent contrer les efforts internes exercés par la matrice.

G. Les propriétés chimiques de l'agrégat: dans le cas des bétons classiques, on utilise des agrégats de roches d'origine naturelle concassées ou non qui sont considérées comme chimiquement inertes vis-à-vis du ciment. Cependant, dans le cas des bétons légers, on utilise quelquefois d'autres produits, tels que les résidus de végétaux. Les variations dimensionnelles sont souvent très importantes, surtout dans le cas où l'on observe une incompatibilité chimique avec le ciment.

H. Les adjuvants: ils sont largement utilisés dans l'industrie du béton. Ils permettent une réduction du temps de prise du ciment, et un gain en résistance initiale. En revanche, leurs effets sur la stabilité dimensionnelle ne sont pas toujours positifs. Le retrait peut augmenter considérablement dans les premiers jours, et il est d'autant plus important, que les quantités d'adjuvants sont plus grandes.

I. Le compactage: il dépend fortement du rapport eau/ciment. Un rapport faible ou excessif ne permet pas un tassement correct. Dans le premier cas on observe la présence de grosses bulles d'air, dans le second il y a des chemins préférentiels dus à la migration de l'eau, ainsi qu'une hétérogénéité du béton causée par le mouvement des agrégats. Selon LEHMAN (1961), cité par AVRAM et coll. (1981), le retrait est fort dépendant du volume d'air emprisonné dans le béton.

J. La géométrie de l'éprouvette: l'augmentation du rapport volume/surface de l'éprouvette permet la réduction du retrait. Toutefois, il n'est pas facile de bien séparer les effets dus à la géométrie ou à la taille de l'éprouvette, des autres effets dus au tassement. De plus, la précision de la mesure des dimensions dépend fortement de la taille de l'éprouvette.

K. Les conditions extérieures: l'humidité relative est un facteur essentiel dans le contrôle de la migration de l'eau hors du béton. Il est impératif que le retrait du béton ne commence qu'après une certaine stabilisation de la matrice.

L. L'âge de l'éprouvette: un béton encore jeune et humide ne présente pas un gonflement important. En revanche, l'évaporation trop rapide de l'eau provoque un retrait rapide, ainsi que la formation de fissures qui endommagent l'éprouvette. Un béton âgé immergé dans de l'eau présente un gonflement qui ne dépend pas de son ancienneté (AVRAM et coll., 1981).

II.3.5.2.5 CURE PAR UNE MISE EN OEUVRE DE CYCLE DE SECHAGE ET D'HUMIDIFICATION

Les modifications du comportement mécanique du béton dues à la cure, ont toujours attiré l'attention des chercheurs. Très peu de chercheurs se sont intéressés à l'étude de la stabilisation dimensionnelle du béton vis-à-vis des changements de l'humidité. Toutefois AVRAM et coll. (1981) ont présenté des résultats très intéressants, observés sur des bétons ayant subi des cycles alternés de gonflement et de retrait.

La procédure normale préconise de stocker le béton dans un milieu dont l'humidité relative permet un "transfert" du retrait jusqu'au moment où la matrice a une résistance suffisante pour mieux supporter les contraintes internes. Le béton placé alternativement à l'air et dans l'eau, subit des retraits (**R**) et des gonflements (**G**) qui sont partiellement réversibles. Les déformations dues au retrait sont beaucoup plus importantes que celles dues au gonflement (figure 8).

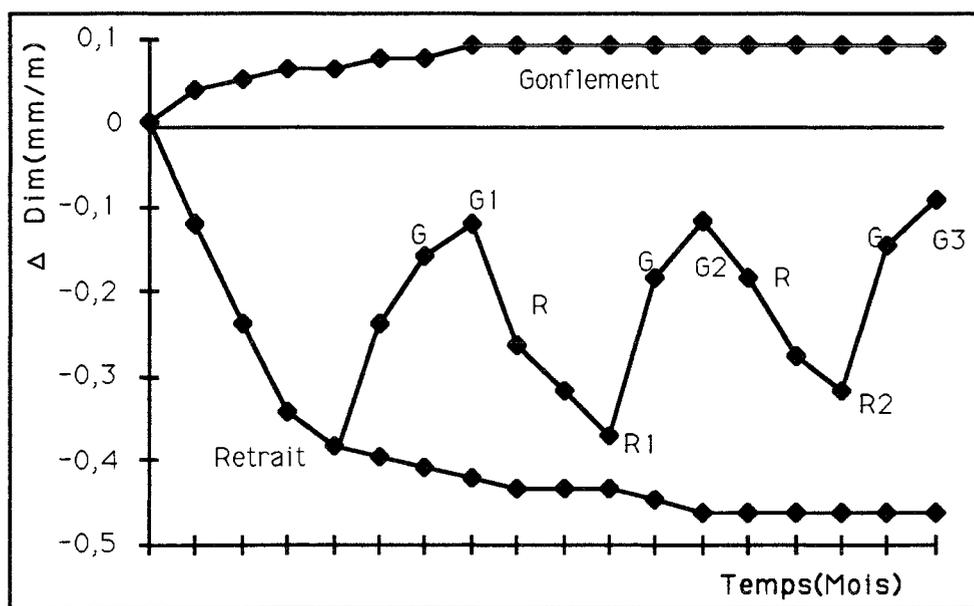


Figure 8 - Effet des cycles de retrait (**R**) et de gonflement (**G**) sur la stabilité dimensionnelle du béton (D'après AVRAM et coll., 1981)

On observe des variations dimensionnelles réduites pour un béton ayant subi une alternance de cycles d'humidification et de séchage. Les écarts entre les différents pics de la courbe présentée au milieu de la figure, sont considérablement réduits, et on obtient donc une meilleure stabilité dimensionnelle du béton. AVRAM et coll. (1981) ont affirmé que le retrait du béton au cours du temps obéit à une loi logarithmique, qui dépend de

l'âge du béton. Ils en ont conclu que le retrait du béton est d'autant plus réduit que l'on débute les essais le plus tard possible.

LAFUMA (1965), cité par AVRAM et coll. (1981), a cependant remarqué "qu'indépendamment des conditions initiales de cure, le retrait final du béton reste identique".

Un béton durci placé dans un milieu humide voit le relancement des réactions chimiques d'hydratation, et par conséquent une "fermeture" plus efficace de la matrice. Toutefois, il est nécessaire de déterminer les paramètres idéaux afin d'utiliser cette technique dans les procédés industriels de fabrication du béton. Il faut choisir la durée de chaque cycle, ainsi que les conditions de séchage et d'humidification. En effet, si on débute les cycles au moment où le durcissement du béton se produit, on observe que le gonflement diminue au fur et à mesure que l'âge augmente (AVRAM et coll., 1981).

Le béton est un système hétérogène constitué d'une matrice (le ciment), d'un catalyseur (l'eau), et d'agrégats inertes. Ce composite est très sensible aux changements du milieu extérieur (humidité, température) pendant les périodes initiales d'hydratation (la prise), et de durcissement. Il est nécessaire d'éviter une perte prématurée d'eau, surtout dans un environnement particulièrement sec. Ainsi, on protège les ouvrages d'un séchage prématuré et parfois même on les arrose pendant un certain temps, pour permettre un bon déroulement des réactions d'hydratation. Un béton partiellement hydraté a une résistance mécanique faible et on observe un grand nombre de fissures.

Actuellement lors de la fabrication de produits à base de ciment, on utilise couramment des techniques d'étuvage ou de cure dans des chambres humides. Le temps de séjour d'un produit donné est fonction de ses dimensions.

La plus grande partie des travaux de recherche sur le béton porte sur le rôle des cures sur les caractéristiques mécaniques. Un béton ayant subi une cure dans un milieu humide présente une résistance supérieure à celle d'un béton normal. La cure, dans un milieu humide, favorise les réactions d'hydratation du béton.

II.3.6 PROPRIETES MECANIQUES DU BETON

La résistance mécanique du béton traduit l'ensemble des étapes ayant conduit à sa fabrication. Les essais sont divisés en deux catégories : les essais destructifs et les essais non-destructifs.

II.3.6.1 ESSAIS DESTRUCTIFS

Les essais destructifs les plus fréquents sont la compression (réalisée sur des éprouvettes cubiques ou cylindriques), la traction (directe ou obtenue par compression diamétrale), la flexion (à une ou deux charges). Les caractéristiques mécaniques déduites sont la contrainte de rupture (MOR), la contrainte limite de proportionnalité (LP), le module d'élasticité (module d'Young- MOE), et le coefficient de Poisson (ν).

a) essai en compression ou écrasement : ils sont réalisés sur des éprouvettes cubiques de 7, 14 ou 20 cm d'arête, ou sur des cylindres de 32 cm de hauteur et 16 cm de diamètre. On s'oriente vers un choix d'essais réalisés sur des éprouvettes cylindriques, qui présentent une résistance d'environ 80% par rapport à une éprouvette cubique de composition identique (VENUAT, 1978).

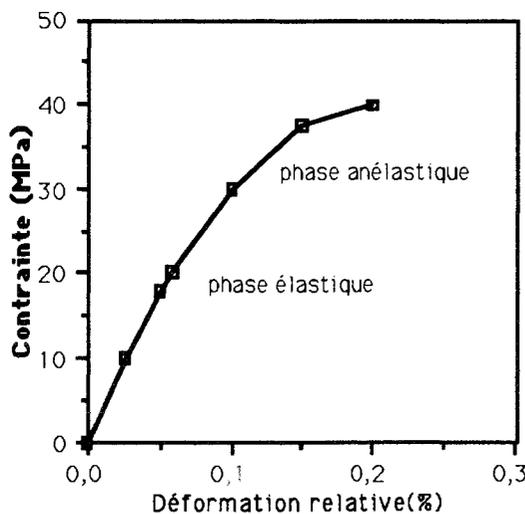


Figure 9 - Diagramme contrainte x déformation relative du béton en compression (D'après ADAM et coll., 1984)

La figure 9 est relative à un essai de compression du béton. Il apparaît deux phases distinctes : la phase élastique (où l'on peut appliquer la loi de Hooke) et la phase non élastique (au dessus de 20 MPa). La rupture du béton étant souvent considérée comme fragile ("explosive"), la charge est brusquement réduite à zéro. Toutefois l'aspect du diagramme contrainte-déformation relative peut être radicalement modifié par des altérations au niveau des granulats, surtout après inclusion de fibres de différentes natures.

On obtient une valeur du MOR d'environ 40 MPa; celle de LP est d'environ 20 MPa. La valeur du MOE (pente de la courbe dans la phase

élastique) est d'environ 18/0,0005, ce qui correspond à 36000 MPa. On peut évaluer le MOE, à partir de la résistance à la compression (R_b en MPa) et de la masse volumique (MV en kg/m^3) :

$$MOE = 1100 * \sqrt[3]{R_b}$$

ADAM et coll. (1984)

$$MOE = 1,67 * MV * \sqrt[3]{R_b}$$

DREUX (1986)

Le coefficient de Poisson qui est le rapport entre les déformations relatives de l'éprouvette selon l'axe transversal et longitudinal, est de l'ordre de 0,15 pour le béton léger (DREUX, 1986) et de 0,20 pour le béton normal (ADAM et coll., 1984). AVRAM et coll. (1981) le situent entre 0,20 et 0,30 (pâte de ciment) et entre 0,10 et 0,30 (agréats naturels). DURAND (1975), en étudiant différentes compositions de béton par une méthode ultrasonore a trouvé une valeur de 0,25. Toutefois, il faut différencier les coefficients obtenus selon les méthodes destructives et non-destructives (AVRAM et coll., 1981).

b) essai de traction directe : l'essai est réalisé sur des éprouvettes 7 x 7 x 28 cm (VENUAT, 1978). Compte tenu des difficultés pour effectuer cet essai, on utilise la méthode de compression diamétrale qui provoque la fendage d'un cylindre (16 cm de diamètre et 32 cm de longueur). Cette méthode, connue dans la littérature comme "la méthode brésilienne ou de Lobo Carneiro", permet de traduire la résistance à la traction du béton (R_{bt}), par la formule:

$$R_{bt} = \frac{2 * P}{\pi * D * L}$$

où P = charge de rupture (N) D = diamètre (mm) L = longueur (mm)

Compte tenu des difficultés pour réaliser les essais de traction sur des bétons et des bétons légers, certains auteurs proposent de les évaluer par des résultats traditionnels obtenus lors des essais d'écrasement :

$$R_{bt} = 0,52 \sqrt[3]{R_b^2}$$

ZIMBELMAN (1978)

$$R_{bt} = 0,6 + 0,06 R_b$$

ADAM et coll. (1981)

c) essai de flexion statique : l'essai est réalisé sur des éprouvettes (7 x 7 x 14 cm ou 14 x 14 x 56 cm), en 3 ou 4 points. La rupture de l'éprouvette est relativement brutale, et la fissure qui apparaît normalement au centre de l'éprouvette, est parallèle à la direction de la charge.

II.3.6.2 ESSAIS NON-DESTRUCTIFS SUR LE BETON

Lors de ces dernières années, plusieurs méthodes et équipements ont été développés pour évaluer de façon scientifique les propriétés de différents matériaux, ou d'ouvrages finis, tout en préservant leurs structures d'origine.

De telles méthodes sont appelées non-destructives, et ont été mises au point pour la détection de défauts dans les métaux et leurs alliages. Les résultats obtenus sont généralement reproductibles et les différences quelquefois observées sont dues à la présence de défauts internes, tels que des fissures (JONES, 1967).

L'avantage des méthodes non-destructives réside dans le fait qu'elles offrent une évaluation correcte de la qualité du béton au sein même de l'ouvrage, sans avoir à se rapporter aux résultats obtenus sur des éprouvettes qui ne sont pas toujours représentatives de celui-ci.

Les méthodes non-destructives peuvent se différencier selon leur origine et leurs applications. Parmi celles-ci, on peut citer les méthodes acoustiques ou ultrasoniques, la méthode mécanique de surface, la méthode atomique, la méthode électromagnétique et les méthodes combinées. La méthode acoustique ayant été la seule à être utilisée dans la partie expérimentale, nous nous limiterons à sa présentation.

a) Méthodes acoustiques

La méthode de l'impulsion ultrasonique permet de connaître la vitesse de propagation du son à travers les objets. Une impulsion de vibrations longitudinales est produite par un "transducteur" électro-acoustique, qui est maintenu en contact avec l'éprouvette. Ensuite, l'impulsion vibratoire est convertie en un signal électrique par un second "transducteur" électro-acoustique, ce qui permet la mesure du temps de propagation. Un parfait accouplement entre l'éprouvette et les

"transducteurs" est nécessaire. On peut utiliser de la vaseline ou une pâte constituée de kaolin et de glycérol (JONES et FĂCĂOARU, 1969).

Cette méthode est intéressante car elle permet d'évaluer le changement des caractéristiques d'un matériau comme le béton selon plusieurs paramètres, tels que l'âge, la composition et le conditionnement. Pour l'étude des propriétés élastiques, telles que le module dynamique d'Young et le coefficient dynamique de Poisson, on utilise les méthodes combinées d'impulsions ultrasonores et de fréquences de résonances (JONES et FĂCĂOARU, 1971).

La méthode de la résonance est basée sur l'application d'une percussion à l'extrémité de l'éprouvette, ce qui permet d'obtenir la fréquence naturelle de vibration de l'éprouvette, et par conséquent la vitesse de déplacement de l'onde (ROSS et PELLERIN, 1988; CTFT, 1989). Cette méthode est recommandée pour obtenir le coefficient de Poisson du béton (AVRAM et coll., 1981). Cependant, les éprouvettes de composites en ciment sont quelquefois trop humides pour obtenir un signal de résonance suffisant. Dans ce cas, la méthode de l'impulsion s'avère plus adéquate. Elle présente des avantages importants, sa configuration lui permet d'être utilisée sur le terrain (JONES, 1967) et sur des éprouvettes de taille différente. En revanche, la méthode de la résonance exige que la section droite de l'éprouvette soit régulière, et que la longueur soit importante par rapport aux autres dimensions.

L'utilisation des méthodes acoustiques permet une évaluation rapide des caractéristiques des éprouvettes. On peut suivre le changement des caractéristiques mécaniques en fonction du temps, ou étudier l'hétérogénéité des éprouvettes à partir des mesures effectuées en différents points. En revanche, lors d'essais classiques, il s'avère difficile de séparer les effets dus à la fabrication même des éprouvettes, de ceux provoqués par les traitements auxquels ces éprouvettes ont été soumises.

Ces méthodes peuvent être bien entendu appliquées à tout autres matériaux et en particulier au bois et aux composites. Pour le bois on pourra consulter les travaux de BUCUR (1980, 1983, 1988), PREZIOSA (1982), ROSS et PELERIN (1988) et SINCLAIR et FARSHAD (1987). Certains de ces résultats sont donnés dans l'annexe I, consacré aux mesures acoustiques effectuées sur les composites biomasse-ciment.

b) Comportement acoustique du béton

Le béton est lui aussi un matériau qui contient un grand nombre de défauts qui découlent du processus de fabrication et des réactions chimiques qui se poursuivent pendant sa prise et son durcissement. Les propriétés du béton ne sont pas forcément reproductibles, même si on fabrique les éprouvettes selon les recommandations des normes techniques. Les résultats obtenus au moment des essais mécaniques classiques, à partir d'éprouvettes cubiques ou cylindriques, donnent une valeur de la résistance globale et ne permettent pas la détection des défauts pouvant se présenter. En revanche, l'utilisation des méthodes ultrasonores permet de suivre au cours du temps l'évolution des caractéristiques technologiques du béton et des composites à base de ciment, de façon rapide et fiable.

Le béton n'est pas un matériau inerte si l'on considère ses constituants fondamentaux. Les réactions chimiques qui permettent son durcissement, se poursuivent durant un temps très long (en fonction de son épaisseur, et des conditions ambiantes). De tels changements sont susceptibles d'être décelés par la mesure des vitesses de l'onde sonore. Ainsi DURAND (1975) a suivi les caractéristiques de 18 bétons de composition différente, par la méthode des impulsions ultrasonores. Ces bétons sont différents par leurs proportions du ciment (250 kg/m^3 jusqu'à 450 kg/m^3), et en agrégats, par la nature des ciments et par le type de conditionnement des éprouvettes (exposition à l'air ou immersion dans l'eau). Dans tous les cas, la vitesse de propagation de l'onde augmente très rapidement pendant les premières heures et pendant les premiers jours pour atteindre ensuite une valeur pratiquement constante.

Toutefois l'atteinte de la valeur asymptotique est différente et certains auteurs ont mis en évidence l'influence du rapport massique eau/ciment (KAPLAN, 1959, cité par JONES, 1967), des conditions de température et d'humidité du milieu environnant (JONES et FACAOARU, 1971), du rapport massique agrégats/ciment (JONES et FACAOARU, 1969, AVRAM et coll., 1981), de la nature du ciment (JONES et FACAOARU, 1971, DURAND, 1975, AVRAM et coll., 1981), etc.

c) Relations entre la résistance mécanique et les vitesses de propagation dans le béton

L'influence de certains paramètres sur la vitesse de propagation étant similaire à celle sur les caractéristiques mécaniques, certains auteurs ont

cherché à corrélérer la vitesse de propagation aux caractéristiques mécaniques. Ainsi la résistance mécanique du béton à l'écrasement (R_b) est évaluée à partir de la vitesse de propagation (v_i) par les relations suivantes :

a) en Pologne: $R_b = a V_i^2 + b V_i + c$

b) en Slovaquie et en Allemagne: $R_b = a V_i^b$, où $b = 4$

$R_b = a (V_i - V_f)^n$ où V_f est la vitesse de propagation(béton frais)

c) aux Pays-Bas et en Roumanie : $R_b = a \exp(b V_i)$ où $b=1,1$

En France, la résistance du béton est liée à son module dynamique E_d (présenté ci-après)

$$R_b = \left(\frac{E_d}{k}\right)^2 \quad \text{où } 17000 < k < 24000$$

$$R_b = \left(\frac{E_d}{k} + 1,1\right)^{4,3} \quad k=134000$$

JONES et FACAOARU (1968) ont fait une enquête auprès de plusieurs utilisateurs de la méthodologie des ultrasons dans l'étude du béton. La plus grande partie d'entre eux se servent de la méthode acoustique pour évaluer la résistance du béton "in situ", à partir de l'étalonnage de la résistance en fonction de la vitesse de propagation. Pour les auteurs, cette utilisation est la plus controversée car les résultats obtenus dépendent des conditions de cure, de l'âge de l'éprouvette, de la fabrication, du compactage, et des caractéristiques propres à chaque béton (teneur et type de ciment, rapport entre les granulats, adjuvants, etc.).

D'autre part, selon JONES et FACAOARU (1969), le module dynamique de Young du béton (E_d) peut être déterminé à partir de la vitesse(v_i) et du coefficient dynamique de Poisson (ν_d), par la formule :

$$E_d = \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)} \rho v_i^2$$

La valeur de ce coefficient pour les bétons âgés de plus de 14 jours, se situe entre 0,2 et 0,35. La partie "fractionnaire" de la formule, qui est une "fonction du coefficient dynamique de Poisson"($f(\nu_d)$), se situe entre 0,90 et 0,63. De cette manière on peut écrire :

$$E_d = f(\nu_d) \rho v_i^2$$

DURAND (1975) a trouvé pour différents bétons une valeur moyenne de $f(v_d)$ égale à 0,85, pour des éprouvettes âgées de 28 jours . A partir de ces résultats on peut en conclure que la valeur de $f(v_d)$ ne dépend pas de manière importante, ni du ciment et de la quantité utilisée, ni de la proportion entre les agrégats et de la cure.

La relation précédente est valable pour une pièce en béton de longueur infinie (AVRAM et coll., 1981). Par la suite il faut que la plus petite dimension perpendiculaire à la direction de la propagation (d) soit le double de la longueur d'onde (λ).

La méthode la plus appropriée pour obtenir v_d est la méthode de la résonance. A partir de la fréquence fondamentale de résonance longitudinale (f_1) et de la vitesse de propagation longitudinale (v_l) , selon JONES et FACAOARU (1969) et AVRAM et coll. (1981), on peut écrire:

$$f(v_d) = \frac{(1 + v_d)(1 - 2v_d)}{(1 - v_d)} = \left(\frac{2f_1}{v_l}\right)^2$$

Si on pose $k_p = 1 - f(v_d)$, v_d est la solution positive de l'équation :

$$2v_d^2 + v_d k_p - k_p = 0$$

Une autre façon de calculer v_d est d'utiliser la vitesse longitudinale (v_l) et la vitesse transversale (v_t). Cette dernière est obtenue en utilisant une direction de polarisation, qui est perpendiculaire à celle de la propagation. A partir des travaux de JONES et FACAOARU (1971), DURAND (1975) et AVRAM et coll. (1981), on peut écrire:

$$v_d = \frac{0,5 - a^2}{1 - a^2}$$

Le coefficient a étant le rapport entre les vitesses transversales et longitudinales. L'obtention de la vitesse de propagation transversale est plus difficile. Il est nécessaire de déterminer l'orientation optimale de l'éprouvette, de manière à permettre d'obtenir un signal satisfaisant. De plus, l'énergie disponible pour la vibration de l'éprouvette est normalement plus faible que dans le cas des propagations longitudinales, ce qui conduit à des signaux qui sont souvent très difficiles à interpréter.

II.3.7 CARBONATATION DES BETONS

La chaux et les mortiers à base de chaux sont des matériaux de construction utilisés depuis longtemps (BERGER et coll., 1972). Leurs durcissements sont obtenus à la suite de réactions chimiques en présence d'anhydride carbonique contenu dans l'atmosphère qui produit du carbonate de calcium. Dans un premier temps, la réaction est rapide. Il y a ensuite diffusion lente du gaz à travers l'éprouvette, ce qui conduit à une couche externe plus dure. De plus, tous les composites à base de ciment (qui contiennent une part importante de chaux), peuvent présenter un comportement identique vis-à-vis du CO₂. Le béton, lui aussi, est le siège d'une carbonatation lente et voit augmenter sa résistance mécanique, sa résistance aux agents agressifs, sa dureté, son étanchéité et sa stabilité. De plus, on constate une réduction de sa porosité et éventuellement une réduction des efflorescences (dépôt de sels remontés par capillarité)(VENUAT, 1984).

Sur certains aspects, les avis des différents chercheurs divergent. Certains prétendent que l'évaluation de la progression de la carbonatation par différence de masse, n'est pas une mesure correcte. En effet, on obtient une variation pondérale des éprouvettes, mais il faut tenir compte de la quantité d'eau importante qui a été dégagée pendant la réaction.

L'évaluation de la carbonatation par la mesure de la profondeur de la couche carbonatée, réalisée avec de la phénolphtaléine, a été étudiée par VERBECK (1958). Il a montré que les essais à la phénolphtaléine n'étaient pas concluants, car les zones de l'éprouvette qui ne présentaient pas de couleur rougeâtre (par hypothèse la partie carbonatée), pouvait être des zones où apparaissent d'autres produits acides libérés pendant la réaction.

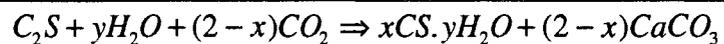
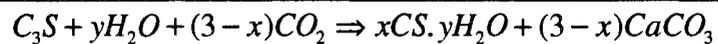
STEINDUR (1957), cité par VERBECK (1958), a conclu que la carbonatation complète du ciment est chimiquement possible même avec de faibles concentrations de CO₂ (pression partielle réduite). Selon LACHAUD et SALOMON (1984), le CO₂ contenu dans l'air peut agir soit directement sur le béton (phase gazeuse), soit après solubilisation dans l'eau. Ils ont remarqué que ce dernier mode d'action paraissait plus efficace.

Quelques brevets sur la carbonatation de composites à base de ciment ont été déposés aux États Unis dans les années 70. Parmi eux, celui de BLACK et coll. (1971), cité par BERGER et coll. (1972), qui considérait que

les réactions de carbonatation débutaient initialement dans une pellicule aqueuse qui enveloppait les particules de ciment.

MEYERS (1949), STEINDUR (1957) cité par VERBECK (1958) ont conclu que tous les constituants du ciment sont sujets à la carbonatation dans des conditions idéales. Les différents constituants présentent un comportement particulier en présence de CO₂. MELLOR (1940), cité par VERBECK (1958), a montré que les ions sodium, par exemple, se présentent sous forme de NaHCO₃ (12%) et Na₂CO₃ (88%), lors de la carbonatation par l'air (% CO₂ = 0,03). Toutefois, en augmentant la pression de CO₂ à une atmosphère, on obtient presque exclusivement du NaHCO₃. En revanche, dans le cas du calcium, même sous faible pression de CO₂, il y a prédominance du CaHCO₃. STEINOR (1957), cité par VERBECK (1958), a trouvé que le magnésium reste sous forme d'hydroxyde lors de la carbonatation par l'air et se présente sous forme de carbonate sous une atmosphère de CO₂. Il a également affirmé que le gypse ne subit aucune carbonatation.

BERGER et coll. (1972) ont étudié le comportement de carbonatation des constituants modèles du ciment Portland artificiel - le C₃S et le C₂S, dans un réacteur fermé en présence d'une pression de CO₂ d'une atmosphère. Ils ont représenté les réactions de carbonatation, par :



LACHAUD et SALOMON (1984) ont conclu que les principales réactions entre les constituants du ciment et le CO₂ conduisent à de la calcite (avec Ca(OH)₂), à des carboaluminates (avec les aluminates), et à des carbo-silicates (avec les silicates). De telles réactions ne sont pas surprenantes, et elles devraient être considérées comme étant une évolution normale du béton. Toutefois, avec la diminution du pH, le béton peut ne plus assurer la protection des armatures en acier.

a) Paramètres agissant sur la carbonatation

BESSEY (1933), cité par MEYERS (1949), a étudié certains paramètres qui ont une influence sur les caractéristiques des réactions de

carbonatation. Il a conclu que la carbonatation en présence d'une atmosphère saturée d'eau provoque la formation superficielle de CaCO_3 , qui empêche la pénétration du CO_2 . En revanche, si on réduit la quantité d'eau présente dans les pores, ceux-ci seront plus accessibles et la pénétration du CO_2 plus facile. De plus, si l'on place l'éprouvette sous vide partiel afin d'éliminer l'eau formée lors de la réaction de carbonatation, on constate que le taux de carbonatation augmente plus rapidement que dans un milieu humide.

L'humidité est considérée par BESSEY comme étant le facteur ayant le plus d'influence sur le retrait du béton produit lors de la carbonatation (ou pré-carbonatation). Les deux autres paramètres qui agissent sur la carbonatation sont la concentration de CO_2 et la taille de l'éprouvette.

VERBECK (1958) a proposé l'étude de la carbonatation sur les pâtes et les mortiers. En effet, il est plus facile de fabriquer de telles éprouvettes dont on peut suivre le comportement à la carbonatation. MEYERS (1949) a affirmé que l'ajout de sable au ciment permet une meilleure pénétration du gaz, car on augmente ainsi la porosité de l'éprouvette. De plus, il a conclu que l'absence de carbonatation complète était due dans la plupart des cas, à la faible porosité des éprouvettes, et à l'hydratation incomplète des constituants du ciment.

LACHAUD et SALOMON (1984) ont analysé la vitesse de carbonatation sur le béton. Ils ont conclu que la carbonatation, pilotée par la diffusion, progressait à une vitesse qui était fortement dépendante de la microporosité du béton. Pour des bétons stockés à une humidité relative de 65%, ils ont observé que la couche de carbonatation était de 5 mm après un an de stockage, tandis qu'une épaisseur de 25 mm était obtenue après une durée de 25 ans.

VENUAT (1984) a présenté les paramètres qui jouent un rôle important sur la vitesse de carbonatation :

composition du matériau : la nature et la finesse du liant, le rapport eau/ciment, la taille des granulats et la compacité du mélange ;

dimensions des pièces : le rapport entre la surface et le volume de l'éprouvette;

l'état du matériau : la teneur en eau et le taux d'hydratation ;

traitement : l'humidité relative, la teneur en CO₂, le temps et la pression.

L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur la vitesse de carbonatation, est une analyse complexe. SCHMIDT (1993) a affirmé qu'un béton normalement hydraté présente des quantités considérables de chaux et de clinker. En revanche, un béton ayant subi un traitement au CO₂ présente une quantité considérable de calcite (carbonate de calcium) et une quantité réduite de clinker. L'auteur en conclut qu'un traitement au CO₂, pendant une durée de 10 à 15 minutes, serait équivalent à une hydratation normale de plusieurs heures.

L'effet de l'humidité relative sur la carbonatation peut dépendre de la taille de l'éprouvette dans le cas où les traitements sont réalisés rapidement (haute concentration de gaz). L'humidité interne des éprouvettes de taille importante reste élevée, tandis que celle des éprouvettes de dimension plus réduite est rapidement en équilibre avec l'humidité extérieure.

VERBECK (1958) a présenté les résultats obtenus sur des éprouvettes de mortier (1:4) qui à l'âge de 7 jours, ont été placées dans l'air exempt de CO₂ à des humidités relatives de 25%, 50%, 75% et 100%, jusqu'à l'équilibre en masse et en dimensions (52 jours). Les éprouvettes ont ensuite été mises sous atmosphère de CO₂ (1 atm), puis replacées dans les conditions initiales, où elles sont maintenues pendant 60 jours. L'auteur a observé que certaines éprouvettes ont présenté un retrait considérable dû à la carbonatation, mais également une augmentation de masse. Parmi les quatre situations d'humidité relative étudiées, il a pu montrer que dans deux des cas (100% et 25%), il n'était pas possible d'obtenir de résultats favorables :

Humidité de 100% : la carbonatation est incomplète, car la diffusion du gaz est lente en raison de l'eau présente dans les pores. Le gaz doit tout d'abord être dissout dans le liquide présent dans les cavités, et ensuite diffuser lentement à travers la matrice. Il est fort probable que ce processus lent, combiné avec la contre-diffusion des ions calcium vers les couches externes permet la précipitation du CaCO₃ à la surface extérieure des pores, ce qui entraîne leur obstruction (GOODBRAKE et coll., 1979). Un tel mécanisme peut expliquer l'absence d'un retrait significatif des éprouvettes carbonatées en humidité relative élevée. Cependant, au fur et à mesure que l'humidité est réduite par séchage partiel, l'eau évacue les capillaires qui

sont par conséquent mieux exposés à l'action du CO₂, et en même temps, moins sujet à l'obstruction par une précipitation du carbonate.

Humidité de 25% : L'humidité du mortier est trop faible, car une partie de l'eau s'évapore. L'eau restante est sous forme adsorbée à la surface du gel, et n'a pas le même comportement vis-à-vis du CO₂. Les effets d'un retrait prématuré n'ont pas été observés. L'humidité relative réduite associée à la chaleur dégagée de la réaction, provoque une perte rapide d'eau, ce qui entraîne la réduction du taux de carbonatation (GOODBRAKE et coll., 1979).

Humidité de 50% : STEINOUR (1957), cité par VERBECK (1958), et YOUNG et coll. (1974), ont affirmé que les résultats les plus favorables sont obtenus pour des humidités relatives comprises entre 50 et 75%. Pour des humidités relatives inférieures à 50%, on obtiendra une carbonatation plutôt modeste. On notera que le maximum de la carbonatation est obtenu au voisinage de 50%.

Les éprouvettes de taille réduite offrent la particularité de présenter un séchage rapide et homogène. On peut les considérer comme ayant un comportement favorable et uniforme vis-à-vis d'une carbonatation. En revanche, dans le cas des éprouvettes de taille plus importante, on constate une carbonatation hétérogène. En effet, la surface peut "carbonater" au début du séchage, tandis que le centre de l'éprouvette dont l'humidité est très élevée (100%), ne présentera qu'une faible carbonatation. En fin de séchage, on observe l'effet inverse car le coeur de l'éprouvette présente une humidité plus favorable à la carbonatation (50%), tandis que dans les parties externes de l'éprouvette, l'humidité est trop faible.

Les dimensions des éprouvettes jouent un rôle important sur le retrait obtenu en présence de CO₂, tandis que leurs effets sont négligeables dans un environnement qui en est dépourvu. Toutefois, il faut tenir compte de l'effet de l'humidité relative. VERBECK (1958) a observé que pour des éprouvettes placées dans un milieu dont l'humidité relative est de 50%, celles ayant une dimension de 2" x 2" présentent un fort taux de carbonatation (93%), tandis que celles de dimension 1" x 1" et 3" x 3" présentent respectivement des valeurs de 77% et 86%. Dans le cas d'une humidité relative de 75%, il n'a pas noté de différence entre les retraits des éprouvettes, tandis que dans le cas d'une humidité relative de 25%, l'éprouvette 3" x 3" présente un retrait important. Il a pu confirmer la présence d'une réserve d'eau au centre des éprouvettes de taille importante.

VERBECK (1958) a étudié des mortiers âgés de 7 jours qui ont été placés à 50% d'humidité relative jusqu'à l'équilibre. La première série d'éprouvettes "témoins" est placée dans une atmosphère sans CO₂, la deuxième dans l'air (teneur en CO₂ 0,03%), et la troisième dans des milieux dont les concentrations en CO₂ sont respectivement, 1%, 5%, 25% et 100%. Il a noté que le retrait et l'augmentation de masse de l'éprouvette étaient dépendant de la concentration du gaz. Plus on augmente la concentration, plus le retrait est rapide.

STEINOUR (1957), cité par VERBECK (1958), a conclu dans son travail que pour une humidité relative de 50%, une forte concentration de CO₂ augmente l'humidité interne de l'éprouvette, ce qui entraîne une carbonatation prononcée et un retrait considérable. En revanche, dans le cas de faibles concentrations du gaz, il n'y a pas d'augmentation de l'humidité interne, et par conséquent les résultats ne sont pas significatifs.

GOODBRAKE et coll. (1979) ont vérifié que l'effet de la pression partielle était plus important dans le cas des éprouvettes humides. Ils ont affirmé que la carbonatation de celles-ci semblait obéir à un modèle cinétique similaire à celui d'une hydratation normale, avec une réduction considérable du temps de réaction.

Toutefois, il est difficile de bien séparer les effets dus aux différents paramètres tels que la taille de l'éprouvette et la concentration du gaz. Le retrait d'une éprouvette de dimension réduite placée dans l'air (concentration de CO₂ égale à 0,03%), peut être du même ordre que si celle-ci est traitée à 100% de CO₂.

YOUNG et coll. (1974) ont conclu qu'une pression de CO₂ comprise entre 1 et 2 atm favorisait la réaction entre les principaux composants du ciment (C₃S et C₂S) et de la silice(1:1), tandis qu'une pression de 4 atm ne provoquait pas d'effet considérable. Ils ont étudié deux systèmes de traitement des éprouvettes par le CO₂: un système appelé "dynamique" ou "ouvert" (le gaz traverse un récipient contenant du nitrate de magnésium, de façon à maintenir une humidité de 50%), et un second système appelé "statique" ou "fermé" (on introduit tout d'abord les éprouvettes dans un sac plastique, qui l'on remplit de CO₂). Le temps de traitement est compris entre 3 et 81 minutes. Ils ont observé que la réaction fortement exothermique est très rapide (environ 10 minutes), ce qui provoque un dégagement très important de vapeur d'eau, qui se condense sur les parois

du sac plastique. Cette condensation a la particularité de ralentir la réaction.

Le système ouvert présente un développement plus lent de la résistance de l'éprouvette qui dépend fortement du temps d'exposition. En revanche, dans le système fermé les éprouvettes présentent des microfissures provoquées par une brutale élévation de température.

Il est intéressant de remarquer que pour des éprouvettes cylindriques de faible dimension (diamètre 15 mm, hauteur 20 mm), la couche carbonatée n'a qu'une épaisseur de **3 mm** et que l'intérieur de l'éprouvette reste très friable. On peut donc attribuer la résistance mécanique d'une telle éprouvette à la seule zone carbonatée de 3 mm. Les auteurs proposent deux hypothèses pour expliquer ce phénomène : soit que l'évaporation de l'eau au centre de l'éprouvette se produit avant la carbonatation, soit que la carbonatation à la périphérie empêche le CO₂ de pénétrer dans l'éprouvette. Le centre de l'éprouvette étant sec, il ne peut y avoir carbonatation. Si l'on place l'éprouvette en atmosphère humide (50%), puis en présence de CO₂, le processus réactionnel peut s'enclencher et poursuivre l'amélioration de la résistance mécanique de l'éprouvette.

YOUNG et coll. (1974) recommandent d'immerger les éprouvettes ayant subi une carbonatation dans de l'eau pour favoriser l'hydratation. Une carbonatation de 9 minutes suivie d'un séjour dans l'eau de 7 jours laisse apparaître la formation d'un gel C-S-H* de forme aciculaire (en forme d'aiguille). Celui-ci est différent du silicate obtenu dans des conditions d'hydratation normales.

b) Influence de la carbonatation sur la stabilité dimensionnelle

MEYERS (1949) a étudié l'effet de la carbonatation sur la stabilité dimensionnelle des composites à base de ciment. Il a conclu que le ciment sous sa forme colloïdale est responsable de la variation dimensionnelle des éprouvettes en présence d'humidité. La substitution du gel par une structure cristalline constituée de CaCO₃ réduirait de 60 à 70% les variations dimensionnelles, et en même temps permettrait l'amélioration des propriétés physico-mécaniques du béton. L'auteur prétend que s'il était possible d'installer les fabrications de produits en béton à proximité d'une source de CO₂ intéressante (gaz résiduels de combustion ou séchage de la

* C=CaO S=SiO₂ H=H₂O

chaux), il serait très avantageux d'effectuer la carbonatation après la période initiale d'hydratation.

VERBECK (1958) a affirmé que les éprouvettes placées dans des atmosphères différentes, à faible concentration de CO₂, présentent un retrait irréversible après un certains nombres de cycles d'humidification et de séchage. Ceci, au fur et à mesure que des incréments additionnels de la pâte de ciment sont carbonatés pendant la phase de séchage.

Il est intéressant, sur le plan industriel, d'accélérer les retraits à long terme de l'éprouvette. La pré-carbonatation d'un composite à base de ciment, si elle est réalisée avant sa mise en service, est d'une importance fondamentale pour les assemblages corrects des ouvrages. En effet, SHIDELER (1955), cité par VERBECK (1958), a montré que les éprouvettes ayant subi une pré-carbonatation (à 25% d'humidité relative) présentaient des variations dimensionnelles deux fois plus faibles qu'une éprouvette témoin (placée dans un environnement exempt de CO₂).

En résumé, la carbonatation doit être effectuée dans des conditions où l'humidité relative de l'air est de 50%. La taille de l'éprouvette et la concentration du CO₂ influencent la vitesse de carbonatation. Enfin une précarbonatation semble favorable pour limiter le retrait initial du béton.

II.4 COMPOSITES BIOMASSE VÉGÉTALE-CIMENT (CBC)

On désignera pour composite biomasse végétale-ciment ci-après noté CBC, l'association d'un liant minéral quelconque (ciment Portland, ciment magnésien, gypse, etc.), de "granulats" d'origine végétale, et dans certains cas de divers additifs (accélérateurs, charges minérales, plastifiants, entraîneur d'air, etc.). Selon les proportions des différents constituants, et la taille des granulats employés, on peut obtenir une large gamme de composites. Cependant, dans la littérature, on ne modifie pas la terminologie en fonction des différentes formes et dimensions des constituants, et on utilise souvent de manière incorrecte le mot "fibre" pour désigner un fragment de bois. Ainsi, COUTTS (1992) utilise l'abréviation WFR ("wood fiber reinforced cement") pour désigner les produits en ciment renforcés par des fibres. Or, les fibres sont des éléments primaires individuels, et ne sont même pas présentes chez les conifères. Une

dénomination plus correcte consisterait à appeler ces constituants d'origine végétale "particules", car il est très difficile d'obtenir des fibres isolées par voie mécanique. En effet, les fibres isolées sont obtenues seulement par voie chimique, à l'exemple de celles obtenues dans l'industrie de la pâte et papier.

II.4.1 INTERETS DES CBC

Le succès commercial des produits à base de ciment et de bois date des années 1930. Initialement, on fabriquait des panneaux légers "bois et ciment" dont le liant était de la magnésie. Ces panneaux étaient connus sous les noms "Excelsior" (USA) et "Heraklit" (Europe). Au milieu des années 50, plusieurs brevets ont été déposés par la société Elmendorf. La plus grande partie des usines actuelles de panneaux, utilisent des procédés dérivés de ces brevets (DINWOODIE et PAXTON, 1984). Cependant dans les 40 dernières années, le développement des composites à base de laine de bois ("excelsior") a été plus lent par rapport à celui d'autres composites associant le bois et des liants organiques (LEE, 1984).

Le "pourquoi" d'une possible utilisation du bois est lié aux changements dans la technologie de fabrication, à la suite des problèmes posés par l'emploi des fibres d'amiante. BUGNA et coll. (1981) ont affirmé qu'on s'acheminait vers une interdiction de l'utilisation d'amiante dans le domaine du bâtiment. Parmi un certain nombre de possibilités de remplacement des fibres d'amiante, on peut citer les fibres de papier journal recyclé, et de cellulose, dont les coûts sont largement inférieurs à ceux de la plupart des fibres artificielles (HARPER, 1982). De plus, les évolutions au niveau des techniques constructives et des concepts environnementaux ont accéléré la consommation des CBC en Europe (HOLDERNESS, 1990). Toutefois, une enquête réalisée en Grande-Bretagne a montré que le succès potentiel d'un nouveau panneau à base de bois dépendrait de l'opinion des architectes vis-à-vis de ses propriétés de base (KALAFATIS et coll., 1989). Les CBC gardent toujours un aspect de préfabrication, fortement corrélé à une notion de "provisoire" (BUGNA et coll., 1981).

MOSLEMI (1988 a) a expliqué les motifs de l'intérêt des CBC suscité auprès des fabricants. D'abord les matières premières que sont le ciment et le bois (ou une biomasse agricole), sont généralement disponibles sur place, et les usines peuvent être installées à proximité des ressources végétales. Ceci permet une réduction considérable des coûts de transport.

En revanche, dans le cas de l'utilisation de liants organiques, les coûts relatifs au transport, sont normalement très importants par rapport au coût du produit final.

DIX (1988) a présenté une série de possibilités d'utilisation des CBC en construction. Il a cité le cas des applications externes (toitures planes, murs de maisons préfabriquées, meubles, coffrages permanents, revêtement des tunnels, planchers, clôtures de bâtiments industriels, écrans antibruit, stades, etc.), et des applications internes (clôtures avec isolation phonique et résistance au feu, revêtement de maisons à ossature bois, toitures résistantes au feu, panneaux, tuyaux de ventilation, etc.).

L'utilisation des résidus et de sous-produits végétaux permet l'obtention de nouveaux produits, de qualité supérieure, et qui permettent en même temps d'économiser l'énergie et de préserver l'environnement (RASHWAN et coll., 1992). Certaines régions géographiques sont en partie ou totalement dépourvues d'agrégats naturels nécessaires à la fabrication du béton (AROLA, 1993). De plus on peut trouver des chantiers de construction situés au milieu d'une forêt, à une très grande distance des centres de commercialisation des agrégats. Dans ces deux cas, on peut remplacer partiellement ou totalement les agrégats minéraux par ceux obtenus à partir des résidus de bois, le but étant l'obtention d'un béton de résistance moyenne (AROLA, 1993).

IRLE et SIMPSON (1993) ont proposé l'utilisation de la paille des céréales comme matière première alternative pour la fabrication des CBC en Grande-Bretagne. En effet, les fermiers Britanniques produisent environ 12 millions de tonnes de paille, dont la moitié n'est pas utilisée. Parmi les résidus agricoles, les auteurs ont conclu que les fibres de lin sont très intéressantes pour la fabrication des CBC.

AROLA (1993) et ROWELL et coll. (1993), ont affirmé qu'aux États-Unis environ 5 millions de tonnes de résidus de bois sont inutilisés. AROLA (1993) prédit un très grand avenir à l'utilisation du bois comme agrégat pour le béton. ROWELL et coll. (1986) avancent le chiffre de 54 millions de tonnes de bagasse produites dans Monde.

Les caractéristiques d'un CBC dépendent fortement de la biomasse végétale employée. En effet, les granulats présentent des différences au niveau de leurs propriétés intrinsèques, tels que leurs anatomies, leurs caractéristiques physiques, et surtout leurs compositions chimiques. Ainsi,

dans certains pays en voie de développement, le bambou apparaît comme une très importante source de matière première, pour la fabrication des CBC. On trouve dans la littérature de nombreux travaux à ce sujet et dans l'annexe II nous avons rappelé les principales études sur ce matériau.

II. 4.2 CARACTERISTIQUES DES CBC

La plus grande partie des travaux sur les composites biomasse végétale-ciment porte sur l'utilisation de ce matériau sous forme de panneaux pressés de faible épaisseur. Très peu de recherches ont été développées sur la fabrication de blocs non comprimés bois-ciment. Au cours des dernières années, on peut noter un intérêt plus marqué pour ce type de produit (MOUGEL, 1992; RASHWAN et coll., 1992; AROLA, 1993; HOENE, 1993).

II.4.2.1 PROPRIETES DES COMPOSITES BIOMASSE-VEGETALE-CIMENT

D'après les travaux de nombreux chercheurs, on peut signaler certains avantages des CBC comparativement à d'autres matériaux de construction (résistance au feu et aux intempéries). Toutefois, on ne peut pas les considérer comme étant des matériaux miraculeux, capables de résoudre tous les problèmes au niveau de la construction. Parmi les atouts d'un CBC, on peut considérer :

disponibilité de la matière première: théoriquement on peut fabriquer les CBC à partir de plusieurs sources végétales, tels que la bagasse, le bambou, le bois et de nombreux autres résidus agricoles. Toutefois, comme nous le verrons ci-après, il faudra tenir compte du comportement de la biomasse vis à vis du ciment.

masse volumique réduite: généralement les CBC appartiennent à la catégorie des bétons légers, car ils présentent une masse volumique comprise entre 400 et 1500 kg/m³. Une série de propriétés en dérivent : résistance, porosité, tenue au feu, isolation phonique et thermique, résistance aux cycles gel et dégel.

résistance aux agents biologiques: l'alcalinité de la matrice ciment assure la protection de la biomasse végétale contre les attaques des champignons et des insectes. Cependant, l'exposition du composite à des cycles d'humidification et de séchage peut provoquer l'apparition de

fissures, et favoriser ensuite les attaques des particules. GRAM (1986) a affirmé que les longues fibres de "sisal" perdent leur capacité de renforcement, lorsqu'elles sont exposées à l'attaque alcaline du ciment, parce que ces fibres sont alors divisées en petites unités. LEMPFER et SATTLER (1988) ont conclu que les CBC sont endommagés mécaniquement à la fin des cycles alternés d'humidification et de séchage.

bonne stabilité dimensionnelle: contrairement aux panneaux à base de résine, les CBC présentent une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, elle reste encore insuffisante pour permettre leurs usages en ouvrages extérieurs, sans enduits protecteurs.

ouvrabilité: les CBC présentent une fluidité suffisamment importante pour être pompés et injectés éventuellement sous pression. De plus, le CBC durci est plus facilement sciable qu'un béton normal. L'usure des outils nécessaires à sa coupe est moins importante que pour d'autres panneaux à base de bois (DINWOODIE et PAXTON, 1984). De plus, on peut gagner du temps à l'assemblage de ces pièces en CBC, car elles présentent des dimensions plus importantes et plus légères.

En définitive, comme l'a souligné HOLDERNESS (1990) les CBC ont de très grandes possibilités d'utilisation, du fait de leurs usages multiples et leur faible coût. Les usages sont limités, d'après l'auteur, par le manque d'imagination des utilisateurs potentiels. Toutefois, SIMATUPANG et HABIGHORST (1993) ont rappelé les principaux problèmes observés lors de la fabrication des CBC, à savoir : compatibilité chimique très dépendante de l'espèce; temps de prise relativement long; durabilité réduite de la biomasse dans la matrice; instabilité dimensionnelle des CBC et la présence d'efflorescences. Nous allons dans ce qui suit revenir sur certains de ces problèmes.

II.4.2.2 COMPATIBILITE CHIMIQUE ENTRE LA BIOMASSE ET LE CIMENT

La qualité fondamentale que doit posséder l'agrégat de biomasse végétale est de ne pas nuire au liant utilisé (DORLOT, 1986). Le comportement particulier de chaque espèce de bois en présence du ciment est appelé "compatibilité chimique entre le bois et le ciment". On ne peut pas ajouter n'importe quelle biomasse au ciment (VENUAT 1983). En effet, les constituants du bois sont très sensibles au milieu alcalin formé lors de la réaction d'hydratation du ciment.

Un grand nombre d'auteurs ont étudié les mécanismes d'inhibition du ciment par la biomasse végétale, et plus spécifiquement par le bois.

Au cours de l'interaction entre la pâte de ciment et le bois, une partie des hémicelluloses commence à se solubiliser et retarde le durcissement du ciment (SIMATUPANG, 1986; SIMATUPANG et coll., 1988). L'attaque du bois par des alcalis du ciment peut convertir partiellement les hémicelluloses en polymères de sucre, ce qui entraîne à des problèmes de prise du ciment (READING, 1985). Les sucres solubles du bois affectent le processus d'hydratation du ciment (RASHWAN et coll., 1992). Dans le cas du mélèze, la cause principale de son incompatibilité est la présence de l'arabino-galactane dans les extraits solubles dans l'eau (YAMAGISHI et coll., 1980). LIEBER et RICHARTZ (1972) ont signalé qu'une teneur en sucres supérieure à 0,5% provoque des fissures dues au gonflement sur les éprouvettes, ainsi qu'une réduction de leurs résistances. SIMATUPANG (1986) affirme que le glucose (1%) inhibe complètement la prise du ciment.

Lors de la réaction d'hydratation du ciment en présence de particules de bois, les grains de C_3A produisent des ions Ca^{++} et OH^- , qui élèvent le pH de la réaction à 12. Les concentrations des ions continuent à augmenter jusqu'à une concentration critique qui ralentit la cristallisation des silicates de calcium hydratés. Les constituants du bois, tels que les sucres, les acides dérivés, les gluconates, etc., réagissent avec les ions Ca^{++} et OH^- pour former des complexes. Les grains de C_3A sont enrobés par un film de composés organiques, ce qui réduit ou empêche la diffusion des ions (HACHMI et CAMPBELL, 1988).

Les réactions inhibitrices peuvent se développer à l'interface bois-ciment ou dans la matrice, et réduisent les liaisons mécaniques et chimiques entre le bois et le ciment. Les terpènes, les résines et les graisses peuvent migrer à la surface du bois pendant le séchage. La formation d'une couche superficielle hydrophobe réduit les ponts hydrogène entre le bois et le ciment, ce qui entraîne une réduction de la résistance à l'interface (MILLER et MOSLEMI, 1991).

SANDERMANN et coll. (1960) avaient déjà avancé l'hypothèse du retard de la prise du ciment causé par une membrane enveloppant les particules de ciment. Ils n'ont pas avancé une explication rationnelle quant à la formation et à la nature de cette membrane. CASU et coll. (1980) ont analysé les interactions entre les aluminates (C_3A), les carbohydrates et les

aldonates. Ils ont mis en évidence la formation de complexes stables en solution, qui précipitent et enveloppent les grains de C₃A.

JOISEL (1967) a affirmé que la pellicule de glucose ou de divers complexes de calcium n'est pas imperméable à l'eau et aux ions hydratés. L'hydratation du ciment n'est pas arrêtée, mais seulement retardée. Les résistances finales des éprouvettes sont généralement augmentées.

De même, les composants phénoliques, tels que les tanins, ont aussi la capacité de se combiner avec les ions métalliques du ciment, ce qui peut empêcher les réactions d'hydratation. BASH et RACHIMBAEV (1977), cités par MILLER et MOSLEMI, (1991), TACHI et coll. (1988) ont aussi attribué l'incompatibilité du *A. mangium*, à la présence de substances phénoliques, surtout de tanins condensés. Les extraits obtenus pour la même espèce de bois ont été imprégnés dans le bois *C. obtusa*. Cette espèce qui était auparavant compatible avec le ciment a présenté le même comportement vis-à-vis du ciment que *A. mangium*.

SCHWARZ (1988) a vérifié qu'une espèce d'origine brésilienne introduite en Malaisie (*Hevea brasiliensis*) présente une très grande incompatibilité avec le ciment due à des quantités importantes de sucres (1,0 à 2,3%) et d'amidon libres (7,5-10,2%).

FISCHER et coll. (1974) ont affirmé que les substances nuisibles au ciment sont les carbohydrates solubles obtenus par la diffusion des sucres des constituants du bois, et leur conversion en acides sacchariques. KENNERS et RICHARDS (1954) ont toutefois affirmé qu'il y a prédominance de la formation de l'acide lactique sur l'acide saccharidique, dans le cas de la dégradation du glucose et du fructose en présence d'alcalis, ce qui est conforme aux conclusions de SIMATUPANG (1986).

BROKER et SIMATUPANG (1973) ont trouvé, par analyse chromatographique en couche mince et par détermination spectrophotométrique que les éléments perturbant la prise du ciment étaient les sucres et des acides lignosulphoniques. SIMATUPANG (1986) a analysé par chromatographie à échange d'ions, une pâte de ciment mise en contact avec du bois. Dans le cas du hêtre, il a trouvé une quantité très importante d'oligosaccharides, tandis que dans le cas du bouleau, c'est le pic du glucose qui prédomine.

MILESTONE (1977) a conclu que les sucres acides et leurs dérivés sont presque dix fois plus inhibiteurs à l'hydratation du C₃A, que le glucose.

Il a affirmé que le glucoheptate de calcium est le plus grand retardateur de la prise du ciment.

HACHMI et CAMPBELL (1988) ont présenté une analyse très complète sur les mécanismes responsables de l'incompatibilité bois-ciment. Ils ont conclu que la qualité finale du composite dépend des interactions entre les constituants du bois et du ciment. Les prétraitements physico-chimiques du bois minimisent ces interactions et permettent d'améliorer la résistance du CBC.

HACHMI et MOSLEMI (1989) ont affirmé que dans l'analyse de la compatibilité bois-ciment, il faut considérer l'importance de la quantité ainsi que du type des extraits (terpènes, acides gras, tanins, carbohydrates, etc.). Ils ont conclu que les substances solubles dans l'eau ont un effet inhibiteur plus important.

YASUDA et coll. (1992) affirment que les espèces inhibitrices "larch", "western red cedar" et "sugi" contiennent de l'arabinogalactane soluble, qui serait à l'origine de l'inhibition.

D'autres auteurs proposent d'éliminer systématiquement toutes les sciures de bois riches en tannin, tandis que LIGNUM (1960) a affirmé que les bois tropicaux ne sont pas intéressants pour la fabrication des panneaux parce qu'ils inhibent la prise du ciment.

A côté des paramètres chimiques du bois, d'autres paramètres liés à l'espèce, à son état phytosanitaire, à l'époque d'abattage, à la durée et à la nature du stockage, etc, interviennent sur la prise du ciment.

Nature du bois : les feuillus de part leur teneur plus élevée en hémicelluloses sont généralement plus inhibiteurs que les résineux (SIMATUPANG et coll., 1978). Toutefois, HOFSTRAND et coll. (1984), ont étudié 8 espèces de bois américaines, et ont trouvé que le "western larch" était l'essence la plus inhibitrice. Pour SCHWARZ et SIMATUPANG (1984 b), les teneurs maximales en sucres tolérées sont comprises pour les résineux (sauf le "larch") entre 0,4 et 0,5%, tandis que ces valeurs pour les feuillus sont comprises entre 0,20 et 0,25%.

L'état phytosanitaire : selon WEATHERWAX et TARKOW (1964, 1967), l'utilisation de bois de "southern pine" attaqué par des organismes xylophages est la cause probable de l'absence de prise d'un mélange avec du ciment Portland, car l'effet inhibiteur d'un bois attaqué peut être réduit par un mélange de celui-ci avec du bois sain. BIBLIS et LO (1968) en étudiant

la même espèce, ont trouvé un comportement opposé au précédent. L'action des agents biologiques sur le bois permet la réduction de l'effet inhibiteur, suite à la consommation des sucres.

Anatomie : l'écorce du "southern pine" est 9 fois plus inhibitrice que l'aubier et 2,5 fois plus inhibitrice que le bois du coeur (WEATHERWAX et TARKOW, 1967). BIBLIS et LO (1968) ont aussi observé un effet plus néfaste du bois de coeur par rapport à l'aubier. Les extraits sont présents en plus grande quantité dans le coeur (HOFSTRAND et coll., 1984). La cellulose ne présente pas d'incompatibilité avec le ciment. En revanche les hémicelluloses solubles et les sucres simples se combinent avec des ions métalliques et ces réactions sont probablement responsables, en grande partie, des problèmes d'incompatibilité entre le bois et le ciment (HACHMI et CAMPBELL, 1988).

Abattage : la période d'abattage peut jouer un rôle sur la prise du ciment car les teneurs en sucres libres ne sont pas constantes au cours de l'année. Ainsi, FISCHER et coll. (1974) ont trouvé des différences entre les sucres (fructose, saccharose et glucose) contenus dans trois résineux allemands, selon l'époque d'abattage, ou selon la période de l'année. L'échantillonnage réalisé à trois hauteurs différentes (1/10, 5/10 et 8/10 de la hauteur totale) a montré des différences significatives dans la distribution de ces trois sucres. Il est intéressant d'observer que la teneur en sucres la plus importante est obtenue au mois d'avril. En revanche, elle est la plus basse au mois d'août pour une espèce, et au mois de mai pour les deux autres. Dans le cas du peuplier, ils ont observé que les teneurs en sucres, toujours plus importantes dans les parties supérieures de l'arbre (8/10), sont réduites au printemps. L'effet le plus important a été observé sur le fructose, qui disparaît totalement au printemps.

BIBLIS et LO (1968) ont trouvé que le temps de prise d'un mélange de ciment et de bois d'aubier de "southern pine" coupé au printemps était plus long par rapport à celui obtenu avec du bois d'aubier coupé en hiver. CHAPMAN et coll. (1963) cités par WEATHERWAX et TARKOW (1964) ont fait la même observation. READING (1985) signale que dans le cas du "western larch" la teneur en amidon est plus grande au printemps. De même, il y a une concentration des produits inhibiteurs vers la surface externe du bois. Enfin, PUGEL et coll. (1990) ont remarqué que les CBC fabriqués à partir d'un bois juvénile présentent une plus grande instabilité dimensionnelle par rapport à ceux obtenus avec un bois adulte.

Stockage : les teneurs en sucres et en produits inhibiteurs évoluent lors du stockage du bois. Pour le hêtre, la teneur en sucres passe de 0,2% lorsqu'il est peu protégé à 0,1% lorsqu'il sèche à l'air libre sous abri (SCHWARZ et SIMATUPANG, 1984 a).

LEE et coll. (1987) n'ont pas trouvé de différence systématique entre un stockage du bois à 7°C, ou à l'air ambiant. En revanche SCHWARZ (1988) a obtenu une réduction très importante des teneurs en sucres et en amidon d'un bois (*Hevea brasiliensis*) pour un stockage de 10 semaines. La teneur en sucres est réduite par une action enzymatique. Ces transformations des sucres conduisent à des constituants non inhibiteurs au ciment.

Pour SIMATUPANG et coll. (1978) le stockage du bois réduit sa teneur en amidon, en saccharose, en glucose et en fructose. SIMATUPANG et coll. (1988) ont remarqué que la compatibilité du "bouleau" est améliorée après 32 semaines de stockage, à la suite de l'attaque du bois par les micro-organismes. Toutefois, SIMATUPANG (1986) a constaté que le stockage ne réduit pas la quantité des composés phénoliques du bois.

VALENZUELA (1989) a conclu que si la teneur en sucres du bois est réduite d'une façon importante après 3 mois de stockage, une réduction de la teneur en tanins est en revanche plus difficile à obtenir durant cette même période. READING (1985) a affirmé que le vieillissement naturel du bois augmente la résistance du CBC car certains constituants du bois sont éliminés par les eaux de pluie.

II.4.2.3 METHODES POUR L'EVALUATION DE L'INCOMPATIBILITE ENTRE LE BOIS ET LE CIMENT.

La méthode la plus utilisée pour évaluer la compatibilité entre le bois et le ciment est celle qui consiste à mesurer la température du mélange bois-ciment au cours du temps. Cette méthode développée initialement par SANDERMANN et coll. (1960), a été modifiée par WEATHERWAX et TARKOW (1964). Plusieurs auteurs l'ont adoptée (WEATHERWAX et TARKOW, 1967; BIBLIS et LO, 1968; FISCHER et coll., 1974; MILESTONE, 1977; MOSLEMI et coll., 1983; HOFSTRAND et coll., 1984; MOSLEMI et LIM, 1984; SCHWARZ et SIMATUPANG, 1984 b; ZHENG TIAN et MOSLEMI, 1985; LEE et coll., 1987; HACHMI, 1987, 1988;

HACHMI et MOSLEMI, 1989; VALENZUELA, 1989; JAIN et coll., 1989; MILLER et MOSLEMI, 1991; IRLE et SIMPSON, 1993).

Dans un premier temps, le bois est broyé. On retient les particules dont la taille est comprise entre 20 "mesh" et 40 "mesh". Les valeurs normalement utilisées sont de 15 g de particules de bois anhydre, 200 g de ciment et 90,5 g d'eau. Le mélange est placé dans un calorimètre, et on suit l'évolution de la température.

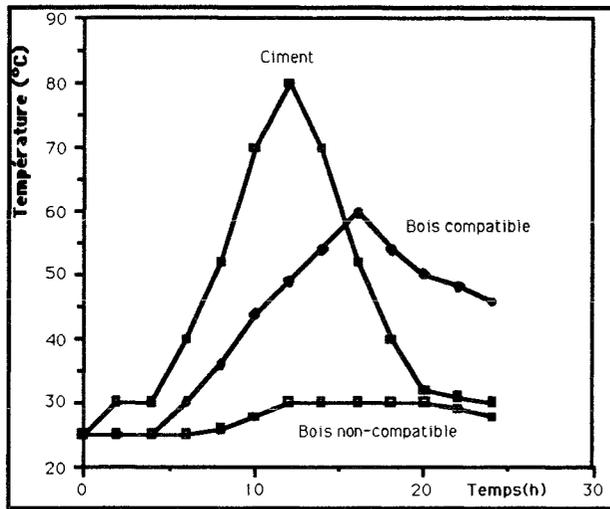


Figure 10- Courbe d'hydratation du ciment et du composite bois-ciment

La figure 10 représente la courbe d'hydratation (température ou chaleur d'hydratation en fonction du temps), de laquelle on tire les paramètres les plus importants nécessaires à l'étude de la compatibilité bois-ciment: le temps de prise du ciment (t_c), la température maximale (θ_c), la pente de la courbe d'hydratation (s_c), ainsi que les caractéristiques du mélange bois-ciment.

Pour une espèce ne présentant pas d'incompatibilité chimique, la diminution de la température est due à l'introduction du bois à la place du ciment et donc à la diminution de la masse et de la chaleur spécifique du milieu.

Dans la littérature, différentes méthodes sont proposées pour évaluer la compatibilité entre le bois et le ciment, à partir des données de la courbe d'hydratation. Certains auteurs proposent pour l'obtention d'un coefficient d'inhibition (I), une comparaison entre le temps de prise du ciment (t_c) et celle du mélange bois-ciment (t_m). D'autres utilisent les températures (θ_c et θ_m), les pentes des courbes d'hydratation (s_c et s_m). On peut citer les formules :

$$I = \frac{t_m - t_c}{t_c}$$

(WEATHERWAX et TARKOW, 1964, 1967)

$$I = \frac{t_m}{t_c}$$

(VALENZUELA, 1989)

$$I = 100 * \frac{(\theta_c - \theta_m)}{\theta_c} * \frac{(t_m - t_c)}{t_m} * \frac{(s_c - s_m)}{s_c} \quad (\text{MOSLEMI et LIM, 1984})$$

Toutefois, WEATHERWAX et TARKOW (1964) ont remarqué qu'un rapport massique bois/ciment d'environ 1/13, proposé par SANDERMANN et coll. (1960), est très loin de la réalité de fabrication d'un panneau bois-ciment. En effet, dans l'industrie on utilise des rapports massiques bois-ciment proches de 1/2. Les auteurs ont affirmé que dans ce cas, l'indice d'inhibition devient 4 fois plus grand.

Le temps de prise du mélange est déterminé plus facilement, à l'exception du cas d'un bois très inhibiteur, où parfois, il n'y a pas d'élévation de température bien définie. La température, à son tour, est très dépendante de l'isolation thermique du calorimètre, ce qui peut empêcher une comparaison des résultats des différents auteurs.

MILLER et MOSLEMI (1991), ont donc proposé la comparaison des surfaces sous les courbes d'hydratation. Ils ont conclu que la différence entre les surfaces dans le cas d'une pâte de ciment témoin et d'un composite, permet de mieux expliquer l'influence du type de ciment, ainsi que l'effet des différents adjuvants. Ils fixent comme limite d'intégration un temps de 48 heures.

JAIN et coll. (1989) ont étudié les caractéristiques d'hydratation de mélanges entre plusieurs espèces de bois et de résidus agricoles et le ciment. Pour certains mélanges, l'énergie libérée dépasse 145 Joules/g, alors que pour d'autres elle n'excède pas 10 Joules/g.

LEE et coll. (1987), LEE et SHORT (1989), VALENZUELA (1989), MILLER et MOSLEMI (1991) ont corrélé la compatibilité bois-ciment aux essais mécaniques. LEE et SHORT (1989) ont conclu que les caractéristiques d'hydratation du mélange bois-ciment ne semblent pas être fortement corrélées à la résistance en flexion. La même conclusion a été faite par MILLER et MOSLEMI (1991) dans le cas de la résistance du composite à la traction ("splitting").

II.4.2.4 TRAITEMENTS PERMETTANT D'AMELIORER LA PRISE DU CIMENT

Nous venons d'indiquer certains paramètres pouvant modifier la compatibilité entre le bois et le ciment. Cependant, des contraintes d'ordre géographique ou économique, empêchent parfois, de choisir les espèces reconnues compatibles, ainsi que de les stocker dans des endroits souhaitables. SIMATUPANG et coll. (1978) ont signalé que les traitements du bois doivent concilier les aspects économiques, en faisant appel à des techniques fiables et simples. Le procédé optimal dépend de la nature du bois disponible dans la région et chaque cas devra être étudié séparément.

WIENHAUS (1979) a proposé l'emploi de ciment à haute résistance initiale, les traitements d'imprégnation du bois, et plus particulièrement l'enrobage des particules de bois par du métasilicate de sodium ou "water glass" (Na_2SiO_3).

Selon SIMATUPANG et coll. (1988) les techniques les plus utilisées pour améliorer la compatibilité entre le bois et le ciment sont : la maturation du bois ou des particules, l'extraction des composants inhibiteurs en milieu aqueux, l'enrobage des particules avec un produit limitant la diffusion des constituants vers l'extérieur, le séchage au four, l'addition de fumée de silice ou de cendres volantes, l'utilisation d'un ciment de haute résistance initiale et les traitements au CO_2 . HOFSTRAND et coll. (1984) proposent comme traitements les plus adéquats, l'extraction à l'eau chaude ou dans une solution de soude diluée.

BERGSTROM et GRAM (1984) ont remarqué de nettes améliorations d'un composite à base de fibres de "sisal" (*Agave sisalana*), en remplaçant 45% de la masse de ciment par de la fumée de silice. Ils ont conclu que la réduction du pH du mélange permettait une meilleure durabilité du composite. GRAM (1986) a proposé une autre alternative en substituant le ciment Portland par un ciment à haute teneur en aluminium. KOHNO et coll. (1988) ont proposé pour la fabrication d'un béton, le mélange de fumée de silice et d'une argile rouge ("red mud") pour des raisons économiques et technologiques. Le béton ainsi obtenu présente une résistance de 100 MPa à 28 jours.

LANGE et coll. (1988) ont également recommandé l'utilisation de la fumée de silice (jusqu'à 50% du ciment) et des cendres volantes pour la fabrication des panneaux à base de bois de feuillus ou du mélèze.

Cependant, le prix de la fumée de silice est plus élevé que celui du ciment. Ils ont proposé la substitution des cendres volantes par des cendres bale de riz (90% de silice).

PAZNER et KLEMAREVSKI (1988) ont conclu que le ciment Sorel (magnésien) est pratiquement insensible aux sucres du bois. Toutefois il présente des inconvénients liés à la cure et au comportement du CBC en présence d'eau. Les auteurs ont affirmé qu'un ciment à base d'oxyphosphate de magnésium est le meilleur choix pour la fabrication d'un CBC à base de n'importe quelle matière première végétale.

SCHUBERT et coll. (1990) ont analysé les interactions entre 18 types de ciments et diverses espèces de bois. Ils ont conclu que les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant des ciments à faible teneur en alcalins et des résineux.

En dehors des méthodes consistant à adapter le ciment à l'essence, les procédés de traitement du bois ou de la matrice permettant de limiter les inhibitions sont les suivants :

a) extraction et le lavage du bois par une solution aqueuse

Il s'agit d'une technique économique. On peut utiliser l'eau seule ou en solution aqueuse mélangée à un alcool (méthanol) ou à un sel soluble ou partiellement soluble ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH). Les résultats obtenus sont assez contradictoires car ils dépendent de l'essence. Pour certains auteurs (MOSLEMI et LIM, 1984; BIBLIS et LO, 1968) l'extraction à l'eau chaude permet de réduire le temps de prise du CBC. En revanche d'autres auteurs (SCHWARZ et SIMATUPANG, 1984 b; RASHWAN e coll., 1992) prétendent le contraire. L'utilisation d'eau chaude permet d'extraire plus de produits (YASIN et QURESHI, 1989) mais aggrave le coût et le problème de traitement des rejets (HACHMI, 1988).

Dans son travail de thèse, MOUGEL (1992) a montré que le lavage à l'eau des particules de bois pour le hêtre et le chêne améliore de façon sensible la prise du ciment. Dans de nombreux cas, ce traitement s'avère suffisant et il ne faut pas rechercher des extractions plus poussés qui peuvent provoquer des dégradations de certains des constituants (par exemple l'hémicellulose) et conduire à un effet contraire à celui recherché (IRLE et SIMPSON, 1992).

b) traitement thermique entre 180 et 270°C

En traitant le bois au delà de 180°C, on élimine l'eau et certains produits volatils mais, on provoque une dégradation thermique des hémicelluloses conduisant à un bois dit rétifé ou torréfié. Le bois torréfié perd son hygroscopicité (DOAT, 1985) par suite d'une élimination à 80% des pentosanes du bois. Les bois séchés ou torréfiés conduisent à des composites possédant des propriétés mécaniques améliorées (LANGE et SIMATUPANG, 1984) mais on n'observe pas d'amélioration des variations dimensionnelles des composites (MOUGEL, 1992).

c) traitement de la surface du bois par pulvérisation ou imprégnation

Pour limiter la production des produits inhibiteurs due à l'attaque des particules de bois par la suspension basique de ciment, certains auteurs ont cherché à réduire les échanges hydriques entre la matrice et le ciment en recouvrant ou en imprégnant les particules de bois.

Ainsi SIMATUPANG et coll. (1978) ont proposé l'imprégnation des particules par du métasilicate de sodium Na_2SiO_3 . Toutefois LEE et SHORT (1989) ont montré qu'un traitement associant un mélange de métasilicate de sodium, de soude et de chlorure de calcium conduisait à une diminution de la résistance mécanique du CBC. D'autres imprégnations permettent d'améliorer les propriétés des CBC. L'imprégnation de sciure de bois avec du lait de chaux conduit à l'obtention d'un composite de plus grande résistance mécanique. Le traitement de fibres de "sisal" par des agents hydrophobes (formine et acide estéarique) permet d'accroître la durée de vie du composite par rapport à celle des fibres non traitées (BERGSTROM et GRAM, 1984; GRAM, 1986).

L'imprégnation de bois par des tanins permet d'accroître la stabilité dimensionnelle des composites et d'après LEE (1984) les résultats obtenus sur le hêtre sont très intéressants.

On peut remplacer l'imprégnation par la pulvérisation et l'enrobage des particules de bois. MOUGEL (1992) a utilisé cette technique pour déposer divers produits tels que des huiles, des émulsions, des polymères. De même YAMAGISHI et coll. (1980) ont recouvert des particules de mélèze par des huiles de lubrification. Ils ont vérifié que l'huile est stable chimiquement vis à vis du ciment et qu'elle en permet la prise. La

technique de pulvérisation peut être utilisée pour déposer des constituants organiques mais aussi des constituants minéraux (KAVVOURAS, 1987).

d) mise en oeuvre d'accélérateurs

L'action des produits inhibiteurs sur la prise et le durcissement du ciment peut être contrecarrée par l'addition de produits (généralement des sels minéraux) qui sont utilisés dans l'industrie du ciment pour accélérer ces deux phénomènes. Dans la littérature spécialisée, on cite notamment les chlorures, les sulfates, les carbonates, les silicates, etc. (DALCQ, 1987). L'utilisation du chlorure de calcium comme accélérateur de la prise du béton fait l'objet d'un brevet dès 1888 (d'après VENUAT, 1984).

JOISEL (1967) a affirmé que les chlorures sont les plus efficaces pour accélérer la prise du ciment Portland. L'utilisation de CaCl_2 (1%) ou de NH_4Cl (3%) a été proposée par KAVVOURAS (1987), dans la fabrication de panneaux. KAYAHARA et coll. (1979) ont sélectionné AlCl_3 à 3% comme un accélérateur efficace. Toutefois, les recherches sur les accélérateurs, n'ont pas apporté les résultats escomptés (HOFSTRAND et coll., 1984).

SIMATUPANG et coll. (1988) ont conclu que l'efficacité d'un mélange d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dépend de l'espèce de bois utilisée. La prise d'un CBC à base d'épicéa a été améliorée, tandis que celle d'un CBC à base de peuplier a été peu modifiée. TACHI et coll. (1988), sont arrivés à la même conclusion en étudiant 5 espèces de bois au Japon. Toutefois, IRLE et SIMPSON (1992) affirment que CaCl_2 (2%) et $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (3%) conduisent aux mêmes effets vis-à-vis de l'hydratation d'un CBC à partir de paille de céréale. Ce sont les mêmes accélérateurs qui sont recommandés pour la fabrication des panneaux creux en Indonésie (SINAGA et coll., 1993). LEE (1990) a trouvé que ni CaCl_2 ni Na_2SiO_3 ne sont efficaces pour les espèces "southern red oak" et "white oak".

STEIN (1961) et TAYLOR (1964), cités par ZHENG TIAN et MOSLEMI (1985), ont affirmé que les chlorures réagissent avec C_3A pour former l'hydrochloroaluminate de calcium. Les grains du ciment sont recouverts d'une couche plus perméable que le ciment proprement dit, ce qui intensifie les réactions. De plus, une couche peut se constituer à la surface du bois, ce qui réduit la libération des substances solubles dans l'eau.

BIBLIS et LO (1968) ont trouvé que le temps de prise du ciment est en relation avec la concentration de CaCl_2 . Les mêmes auteurs ont cité le

travail de CLARE et SHERWOOD (1954), qui ont affirmé, que CaCl_2 apporte un pH plus adéquat à la prise du ciment.

RASHWAN et coll. (1992) n'ont pas trouvé de différence significative entre CaCl_2 et MgCl_2 pour accélérer la prise d'un CBC de "white spruce". Ils ont choisi le premier accélérateur pour des raisons économiques.

ZHENGtian et MOSLEMI (1985) ont trouvé que parmi les 30 accélérateurs qui ont été utilisés pour réduire l'incompatibilité du "larch", certains chlorures SnCl_2 , FeCl_3 , AlCl_3 et CaCl_2 , ont présenté les meilleurs résultats pour un dosage de 5,0 à 6,5% par rapport à la masse de ciment. Le dernier cité est le plus utilisé dans la fabrication du béton et des CBC, même s'il provoque des problèmes de corrosion des armatures en acier (LEE et SHORT, 1989).

MOSLEMI et coll. (1983) ont étudié l'effet de 5% de CaCl_2 et de soude sur deux espèces de bois américains. Ils ont trouvé que la compatibilité est améliorée pour une espèce peu inhibitrice ("lodgepole pine"), tandis que dans le cas d'une espèce très inhibitrice ("western larch") un traitement préalable d'extraction à l'eau chaude est nécessaire.

LEE et HONG (1986) ont étudié la compatibilité de 6 espèces de bois. Ils ont conclu qu'une addition de 3% de CaCl_2 (en masse de ciment) permet d'obtenir un CBC de résistance comprise entre 28 et 34 MPa. Toutefois, YASUDA et coll. (1992) ont vérifié que MgCl_2 et non pas CaCl_2 , est le plus efficace en présence du bois *A. mangium*.

DALCQ (1987) a présenté une étude très complète sur l'effet des accélérateurs exempts de chlorure sur les caractéristiques du béton. Il prétend qu'aucun d'entre eux ne satisfait aux critères d'un bon accélérateur pour le béton.

L'utilisation des accélérateurs permet d'anticiper la prise et le durcissement des CBC. Les résistances initiales dépassent largement celles d'un CBC à prise normale. En revanche, les résistances finales ne semblent pas être modifiées (DALCQ, 1987). De plus, on peut attendre des modifications au niveau des variations dimensionnelles (KUHL, 1961, cité par BROKER et SIMATUPANG, 1974 b; BRUERE et NEWBEGIN, 1967). A ce jour l'action des accélérateurs semble provoquer un accroissement des variations dimensionnelles. En effet, le retrait du béton est doublé par un ajout de 2% de CaCl_2 , et multiplié par dix si l'on ajoute 5% (LIMOSIN,

1981). Le retrait présente une augmentation de 20 à 40% dans le cas de Na_2CO_3 ou d'autres sels minéraux.

II.4.2.5 TRAITEMENTS PERMETTANT DE MODIFIER LES CARACTERISTIQUES DE LA MATRICE CIMENT

L'ajout de sels en faible quantité permet de favoriser la prise et le durcissement et d'accroître les caractéristiques mécaniques initiales du composite. Toutefois, après une certaine période, les propriétés mécaniques demeurent voisines de celles des composites non accélérés. Pour améliorer les propriétés de la matrice et plus précisément ses propriétés mécaniques deux principaux traitements ont été considérés :

- l'ajout dans la matrice d'un minéral de granulométrie adaptée
- la carbonatation de la matrice par l'intermédiaire de l'anhydride carbonique ou d'un carbonate.

a) Ajout d'un minéral de granulométrie adaptée

Dans des composites biomasse végétale-ciment, les particules de bois sont en général de plus grande dimension que les grains de ciment. En l'absence d'une très forte compression (cas des blocs) le composite réalisé est "caverneux" et possède une porosité plus importante. La liaison entre les particules de bois est assurée par des ponts de ciment entre lesquels, il existe des espaces vides. Ces volumes peuvent être comblés par des ajouts minéraux. MOUGEL (1992) a cherché à vérifier les améliorations que pouvaient apporter les ajouts minéraux siliceux aux CBC. La résistance à l'écrasement des composites sont améliorés et on observe une diminution sensible des variations dimensionnelles. Toutefois ces améliorations sont accompagnées d'une augmentation de la masse volumique. L'ajout de minéraux de dimensions voisines ou supérieures à celles des grains de ciment peut être remplacé par un ajout de fumées de silice dont les dimensions sont nettement inférieures à celles du liant. On observe également, dans ce cas, une amélioration des caractéristiques mécaniques. Ainsi l'ajout de microparticules et de particules solides minérales permet de réduire la macroporosité du composite et d'accroître simultanément certaines caractéristiques mécaniques ainsi que la masse volumique du CBC. Signalons enfin que, l'introduction de solides minéraux entraîne une modification de la quantité d'eau à ajouter au ciment. Les travaux de SIMATUPANG (1979) montrent que la masse d'eau est fortement corrélée à

la masse volumique du CBC mais le rapport eau/ciment optimal doit être déterminé pour chaque type de fabrication des composites (LANGE et SIMATUPANG, 1985).

b) carbonatation de la matrice

Lors de l'hydratation du clinker, on aboutit à de l'hydroxyde de calcium. Cet hydroxyde peut être carbonaté par le CO₂ de l'air au cours du temps mais aussi très rapidement en présence d'un apport de carbonate ou d'hydrogénocarbonate. Les produits qui en résultent constituent des liants de la matrice et on peut obtenir, dans ces conditions, une structure solide dont les caractéristiques sont nettement améliorées par rapport à celles de la matrice non traitée.

Il existe encore peu d'articles sur la carbonatation des CBC. Toutefois lors des dernières conférences "Inorganic-Bonded Wood & Fiber Composite", on note l'apparition d'un certain nombre de travaux (LAHTINEN, 1993; SIMATUPANG et coll., 1993; SIMATUPANG et HABIGHORST, 1993; GEIMER et coll., 1993). Nous avons eu régulièrement des échanges avec DE SOUSA effectuant un doctorat sur la carbonatation des panneaux CBC sous la direction de A. MOSLEMI de l'Université d'IDAHO (USA).

La carbonatation a été envisagée par les auteurs pour réduire le temps de pressage des panneaux bois-ciment normalement compris entre 6 et 8 heures. La carbonatation permet de ramener le temps de pressage à quelques minutes.

La carbonatation peut être obtenue par ajout d'un carbonate (SIMATUPANG et coll., 1993). Le carbonate de potassium donne un meilleur résultat que le carbonate de sodium. A l'exemple d'autres auteurs SHIGEKURA (1989) utilise le CO₂ gazeux pour réaliser la carbonatation. Un brevet britannique (MOOREHEAD et DAVIS, 1979) et deux brevets hongrois (SCHMIDT et CARPATI, 1986; KONKOLA, 1989) ont été déposés.

La réaction de carbonatation des panneaux a été suivie par SIMATUPANG et coll. (1993) par une mesure de la conductivité électrique de la pâte de ciment. Lors de l'alimentation du CO₂ on observe une diminution brutale de la conductivité électrique puis une stabilisation suivie d'une deuxième réduction qui correspond à la prise du ciment.

L'utilisation du CO₂ dans la fabrication de panneaux met en oeuvre plusieurs techniques. Un vide partiel est réalisé sur le panneau avant sa mise en atmosphère de CO₂. LAHTINEN (1993) donne des résultats

intéressants obtenus sur des panneaux carbonatés selon une méthode développée par l'Entreprise RAUMA-REPOLA OY (Hongrie). Le temps de prise est réduit à 5 minutes et la résistance du panneau au démoulage est égale à 50% de sa résistance finale.

La vitesse de carbonatation dépend de la porosité du panneau et des rapports eau/ciment et bois/ciment. GEIMER et coll. (1993) ont étudié l'influence de ces paramètres et ont suggéré de remplacer une partie du ciment (5 % en masse) par de la chaux afin d'augmenter la vitesse de carbonatation.

Comme dans le cas du béton, SIMATUPANG et HABIGHORST (1993) ont montré qu'il existait une humidité optimale pour la carbonatation des CBC. Une alternance de cycle séchage-humidification est favorable à la carbonatation. La masse d'eau optimale a été précisée par DE SOUZA (1992) pour un composite de masse volumique de 1400 kg/m³.

Le traitement des composites par le CO₂ semble être représentatif du vieillissement naturel des CBC. En effet dans le cas de composites à base de fibre de cellulose, AKERS et STUDINKA(1989), BENTUR et AKERS (1989), ont montré que le traitement par carbonatation conduit à une évolution similaire à celle d'un vieillissement naturel; on retrouve des produits d'hydratation dans le lumen des fibres. Pour les auteurs, un traitement de 3 à 4 mois dans une atmosphère de CO₂ équivaut à 5 ans de vieillissement naturel.

En définitive, la carbonatation des panneaux permet de réduire la durée de pressage, et les différents travaux à ce sujet ne mettent pas en évidence une amélioration sensible des propriétés finales des panneaux.

II.4.2.6 VARIATIONS DIMENSIONNELLES DES COMPOSITES BIOMASSE VEGETALE-CIMENT

Dans la littérature, on trouve assez peu d'information sur les variations dimensionnelles des CBC, alors que de nombreuses publications concernent les propriétés mécaniques. L'origine du retrait des composites reste mal connu (BROKER et SIMATUPANG, 1974 b). Toutefois, les variations dimensionnelles importantes ont empêché jusqu'à présent une utilisation plus massive de bois dans la fabrication des CBC (ROWELL et coll., 1991). Pour BROKER et SIMATUPANG (1974 a) la quantité de bois, dans les composites, a peu d'influence sur les variations dimensionnelles car

ces dernières sont essentiellement liées à celles du ciment. De même SARJA (1989) affirme que ce sont les fibres naturelles du bois qui contrôlent le comportement de la pâte de ciment humide et que le retrait du CBC est également lié à celui de la pâte. Il propose une relation permettant d'évaluer le retrait final d'un béton léger qui dépend uniquement de la masse volumique du composite. Pour un CBC de masse volumique de 1000 kg/m^3 à humidité initiale de 40%, le retrait calculé est de l'ordre de 5 mm/m.

Pour certains auteurs, les panneaux de composites bois-ciment sont dimensionnellement stables (DINWOODIE et PAXTON, 1984). En effet, les gonflements observés sont nettement inférieurs à ceux observés au niveau des panneaux agglomérés. Ainsi, BADEJO (1989) signale un "petit gonflement" d'un panneau CBC compris entre 1 et 57 mm/m. LEE (1984) a fabriqué un panneau CBC à partir de laine de bois dont la stabilité dimensionnelle en épaisseur et en largeur sont égales respectivement à 8,4 et 1,9 mm/m. MOSLEMI (1988 a, 1988 b, 1990) affirme que les panneaux de CBC ont des stabilités dimensionnelles raisonnables. WALTER (1993) prétend que le produit commercialisé sous le nom de FASWALL présente une grande stabilité dimensionnelle dans l'eau, mais il ne donne aucune valeur numérique. SARJA (1989 b) présente un CBC de masse volumique de 1500 kg/m^3 dont les variations dimensionnelles sont voisines de 2 mm/m.

Pour réduire les variations dimensionnelles, les auteurs ont étudié séparément les composants des CBC (matériau bois, matrice ciment) ainsi que le protocole expérimental. BADEJO (1988), MOSLEMI (1988 a, 1988 b, 1990), BROKER et SIMATUPANG (1974 a) ont constaté l'importance de la géométrie des copeaux. Plus les copeaux sont longs, plus est réduite la variation dimensionnelle du composite. Selon BADEJO (1988) l'augmentation de la masse volumique du CBC accroît à la fois la résistance mécanique et la stabilité dimensionnelle. Il faut donc accroître le tassement du CBC. Pour BROKER et SIMATUPANG (1974 a), SARJA (1989), les variations dimensionnelles sont aussi liées au rapport eau/ciment et plus on accroît ce rapport, plus grand est le retrait. Enfin HANNANT (1984), KUROKI et coll. (1988), ont montré que l'étuvage du composite améliore sa stabilité dimensionnelle.

Le traitement du bois a été envisagé par de nombreux auteurs. Ainsi HOCHDAHL (1945), cité par BROKER et SIMATUPANG (1974 b) affirme qu'il faut traiter les particules de bois par du lait de chaux et du ciment ou par des produits organiques ou minéraux. Le remplissage du lumen rend

plus stable le bois (BENTUR et AKERS, 1989), et en pénétrant à l'intérieur des parois cellulaires, certaines substances empêchent le gonflement et le retrait du bois.

La stabilité dimensionnelle du bois peut être améliorée en acétylant le bois (ROWELL et coll., 1991), mais des contraintes d'ordre économique empêchent ce traitement. L'emploi de PEG en petites quantités (10 à 15% en masse) (BROKER et SIMATUPANG, 1974 a; LEMPFER et SATTLER, 1988) et de produits bitumineux (KUHL, 1961; CZERNIM, 1964, cités par BROKER et SIMATUPANG, 1974 b) réduisent le retrait des composites. Toutefois, dans le cas du bitume, un ajout excessif peut provoquer un accroissement des variations dimensionnelles et une diminution de la résistance mécanique. WIENHAUS (1979) a également proposé l'utilisation du bitume pour boucher les pores du bois, et d'après YAMAGISHI et coll. (1980), pour améliorer les variations dimensionnelles il suffit de boucher les orifices du bois et recouvrir la surface par des substances hydrophobes non nuisibles au ciment. D'après LIMOSIN (1981), le bitume stabilise la chaux.

Enfin, pour limiter les variations dimensionnelles des composites on peut s'intéresser à la matrice ciment. L'étude du Ministère de l'Urbanisme et du Logement démontre l'importance des ajouts de fines (calcaire) pour réduire les variations dimensionnelles du béton de sable. Le retrait est d'autant plus faible que le module d'élasticité du composite est élevé. Les charges telles que les sables qui ont un module d'élasticité plus élevé que le ciment permettent de réduire le retrait du béton (CZERNIM, 1964; cité par BROKER et SIMATUPANG, 1974 b). BROKER et SIMATUPANG, (1974 b) signalent une relation due à PICKETT (1956), qui donne la variation dimensionnelle d'un béton en fonction de la fraction de charge et du rapport du module d'élasticité de la charge vis à vis de celui du ciment.

II.4.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Compte tenu des résultats précédents, le laboratoire du Génie des Procédés a décidé d'entreprendre une recherche sur les composites bois-ciment non comprimés, en se donnant comme objectif de parvenir à une méthodologie globale permettant de limiter les variations dimensionnelles des blocs (mesurés dans les conditions de la norme française) à moins de 1 mm par mètre. Après avoir examiné l'influence des différents paramètres intervenant sur le mode de préparation du composite, sur le matériau bois, à l'interface bois-ciment et à la matrice ciment, dans le cas du sapin des

Vosges, MOUGEL (1992) a proposé une méthodologie qui permet d'aboutir à l'objectif escompté. Ceci dans des conditions où le surcoût lié à certains traitements reste acceptable pour une commercialisation du matériau. Le protocole expérimental préconisé par MOUGEL (1992) comporte 4 étapes, à savoir :

- a) conditionnement du bois: Après avoir débité le bois sous forme de plaquettes, de dimensions adaptées, ces dernières sont lavées afin d'en extraire une partie des constituants à l'origine de l'inhibition de la prise du ciment.

- b) les particules lavées et séchées sont pulvérisées par des produits organiques afin de boucher les pores des particules et limiter les échanges d'eau entre les particules de bois et la matrice ciment.

- c) lors de la préparation du composite, on ajoute aux particules de bois traitées au ciment et à l'eau, des particules minérales de granulométrie adaptée à celle du ciment. Cet ajout permet d'accroître le module d'élasticité de la matrice et de diminuer les variations dimensionnelles.

- d) à l'issue de la fabrication du composite ce dernier après démoulage, est soumis à divers traitements physico-chimiques dits de cure, qui doivent permettre de parvenir à l'objectif visé dans un intervalle de temps proche de celui de la fabrication des blocs conventionnels sable-gravier-ciment.

L'objectif de notre étude est de valider et d'améliorer cette méthodologie en essayant d'apporter une réponse aux problèmes suivants :

- a) la méthodologie peut elle s'appliquer à différentes essences et plus généralement à toute la biomasse végétale susceptible d'être mise sous forme de particules ?

- b) quels sont les paramètres qui ont une influence significative sur les variations dimensionnelles des CBC ?

- c) quelles modifications du protocole ou quels traitements complémentaires doit on effectuer pour que les variations dimensionnelles résiduelles soient atteintes le plus rapidement possible, et ceci avec des produits ou des techniques de coûts limités pour que le CBC fabriqué reste compétitif avec les matériaux traditionnels ?

Pour donner une réponse à ces différents problèmes nous avons repris de manière systématique chacune des étapes du protocole. A partir des résultats obtenus nous essaierons de préciser l'origine des variations dimensionnelles des composites et de préciser un protocole optimisé de leur fabrication.

CHAPITRE III

**PROTOCOLE EXPERIMENTAL
ET GRANDEURS MESURÉES**

III.1 INTRODUCTION

Les caractéristiques physico-mécaniques d'un composite biomasse-ciment (CBC) sont fortement dépendantes de celles de ses constituants majeurs, à savoir: le bois et la matrice ciment. Les adjuvants parfois utilisés, les techniques employées pendant sa fabrication, et les opérations de cure effectuées après sa prise et son durcissement, peuvent contribuer à une modification de ces caractéristiques.

Le présence d'espèces différentes de bois a une influence prépondérante sur la qualité du CBC. Les différents auteurs qui ont étudié l'influence du bois dans la fabrication du CBC sont d'accord sur les problèmes posés par l'utilisation d'espèces dites incompatibles avec le ciment. Toutefois, nous verrons que des techniques appropriées permettent de minimiser les effets néfastes du bois vis-à-vis du ciment et donc de valoriser des matières premières, y compris de qualité médiocre, disponibles à proximité. Dans notre recherche, les études effectuées portent sur trois essences de bois: le sapin des Vosges (*Abies sp*), le pin maritime (*Pinus maritima*), le hêtre (*Fagus silvatica*) et sur deux espèces de bambou (*Phyllostachys sp* et *Phyllostachys viridis*). Rappelons que notre objectif est de généraliser la méthodologie de fabrication des CBC, qui a été mise-au-point par MOUGEL (1992), ainsi que d'optimiser les paramètres liés au traitement du bois et du renforcement de la matrice.

III.2 PRESENTATION DES ESPECES ETUDIEES

La France se trouve parmi les pays les plus boisés d'Europe, avec une surface de l'ordre de 15 millions d'hectares. La région Lorraine dispose d'une surface forestière de plus de 800000 hectares. A part certains départements où les résineux prédominent, l'ensemble de la superficie du sol forestier français est couvert de feuillus (BAZIRE et GADANT, 1991).

On présente ici quelques rappels sur les caractéristiques des essences étudiées.

Le sapin : Il occupe 4% de la surface française boisée. Il est très utilisé pour les charpentes traditionnelles, dans la fabrication de lamellé collé, de panneaux de particules et de caisses pour emballage.

Le pin maritime: Parmi les résineux, il occupe la première place dans l'occupation de la surface boisée avec 11%. A part son utilisation pour l'extraction de la résine (gemmaison), il est très recherché comme bois d'oeuvre.

Le hêtre: Bien que largement dépassé dans la catégorie des feuillus par le chêne (41% de la surface), le hêtre occupe 9% de la surface totale. Ses utilisations principales sont: la fabrication de meubles, de sièges et de jouets. Il est également utilisé dans la fabrication de contreplaqués ainsi que d'objets cylindriques, car il s'agit d'un bois dur.

Le bambou: On a utilisé dans notre travail, deux espèces de bambou, le *Phyllostachys* sp (diamètre externe moyen de 50 mm), et le *P. viridis* (diamètre externe moyen de 70 mm). Elles nous ont été fournies par l'Association Européenne du Bambou, dont le siège se situe à Anduze (Gard).

La taille des différents éléments anatomiques, tels que les vaisseaux, des espèces utilisées, ainsi que leur distribution dans le bois, présentent une importance considérable dans le processus de fabrication du CBC. En effet, il semble fort probable que les espèces présentant des éléments anatomiques de taille plus importante, sont plus accessibles aux produits de traitement, ainsi qu'aux produits de réaction du ciment. Toutefois, il n'est pas évident de faire une comparaison entre les éléments anatomiques des espèces utilisées. Dans le cas de résineux, il y a une grande différence entre la taille des éléments anatomiques selon qu'ils appartiennent à la région de croissance d'hiver ou de printemps, surtout si l'on considère le diamètre du lumen. De plus, il faut ajouter les phénomènes de la duramenisation du coeur, ainsi que la présence de poches de résine surtout importantes dans le cas du pin maritime.

Dans le cas du bambou, on a réalisé une étude anatomique à partir des lamelles découpées avec un microtome. Les lamelles préparées au laboratoire de l'Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-Brésil), ont été

ensuite analysées au laboratoire du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG-Vandoeuvre)* . Le dispositif permettant de réaliser les analyses est constitué d'un microscope à transmission connecté à un ordinateur. L'image transmise sur un écran à haute résolution permet l'utilisation d'un compteur de points. On a effectué une étude sur les pourcentages de chaque élément anatomique du bambou (vaisseaux, fibres et parenchyme) selon la direction radiale. Le but étant d'évaluer le changement des pourcentages, ainsi que la taille des éléments.

III. 3 PREPARATION DES PARTICULES

III.3.1 CONDITIONNEMENT DES PARTICULES

Deux étapes sont nécessaires pour obtenir des particules de bois: la première consiste à débiter le bois dans le sens longitudinal à l'aide d'une coupeuse à volant vertical. Les échantillons placés dans le coupeuse ont une longueur moyenne de 30 cm et d'une largeur de 10 cm (figure 11). On obtient ainsi des particules de forme aplatie ou courbe.

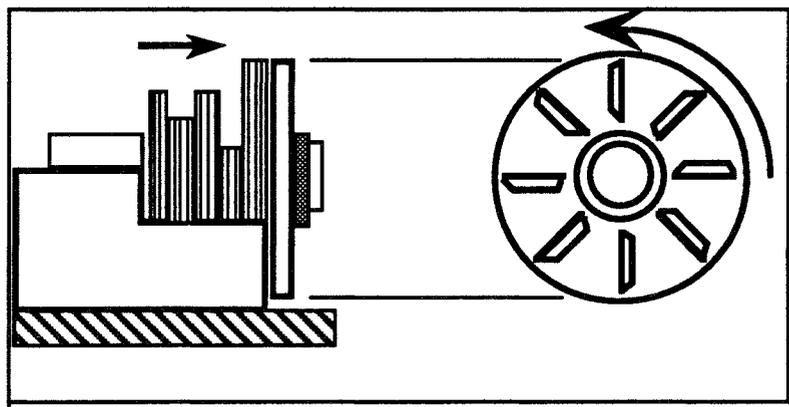


Figure 11- Coupeuse à volant vertical

Pour le bambou, on ne peut procéder de cette manière car il a tendance à éclater en raison des noeuds et surtout de la présence de l'air dans le chaume. On utilisera une scie à ruban pour découper des

* Michel Champenois

échantillons d'environ 3 cm. Encore faut il rester très prudent car même dans ces conditions les risques d'éclatement persistent. On notera qu'avec une humidité élevée, le risque d'éclatement est minimisé.

La deuxième étape consiste à couper les morceaux de bois ou de bambou dans une coupeuse à anneau PALLMAN à grilles interchangeables. On introduit les morceaux de bois ou de bambou dans la partie supérieure du broyeur. Un cyclone aspire les poussières, tandis que les particules sont récupérées à la sortie, dans un sac plastique (figure 12).

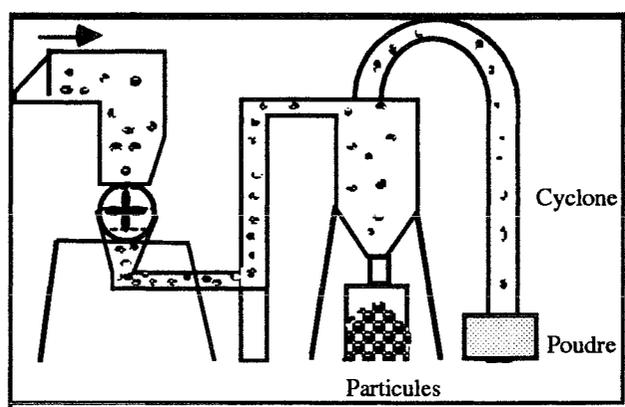


Figure 12- Coupeuse à anneau

Les particules de taille inférieure à 10 mm, sont ensuite tamisées pour permettre la séparation des fines et des particules de taille plus élevée. Les fines ne sont pas utilisées, parce qu'elles présentent une surface spécifique trop importante. Les particules trop grosses posent problème pour le tassement du CBC. On les récupère pour un nouveau broyage (figure 13).

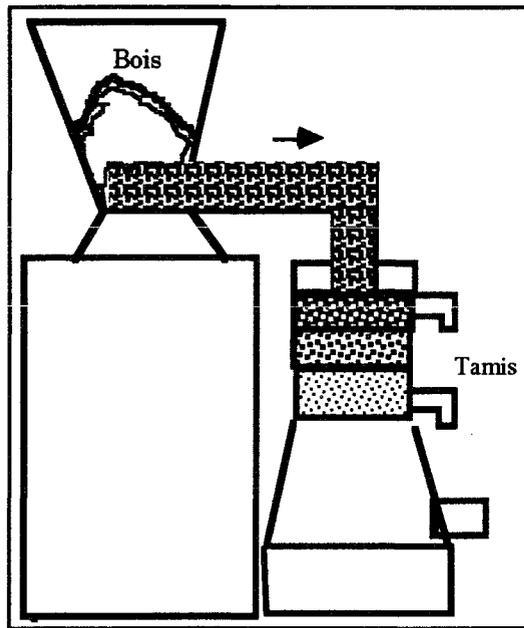


Figure 13- Tamis vibrant ALGAIER

L'humidité joue un rôle très important sur la granulométrie des particules. Un bois trop sec produit beaucoup plus de fines qu'un bois à taux d'humidité plus élevée (BADEJO 1989). Les bois trop humides ont tendance à coller aux couteaux du broyeur.

La granulométrie des particules dépend fortement de la nature de l'espèce. La figure 14 représente la distribution granulométrique du sapin et du bambou.

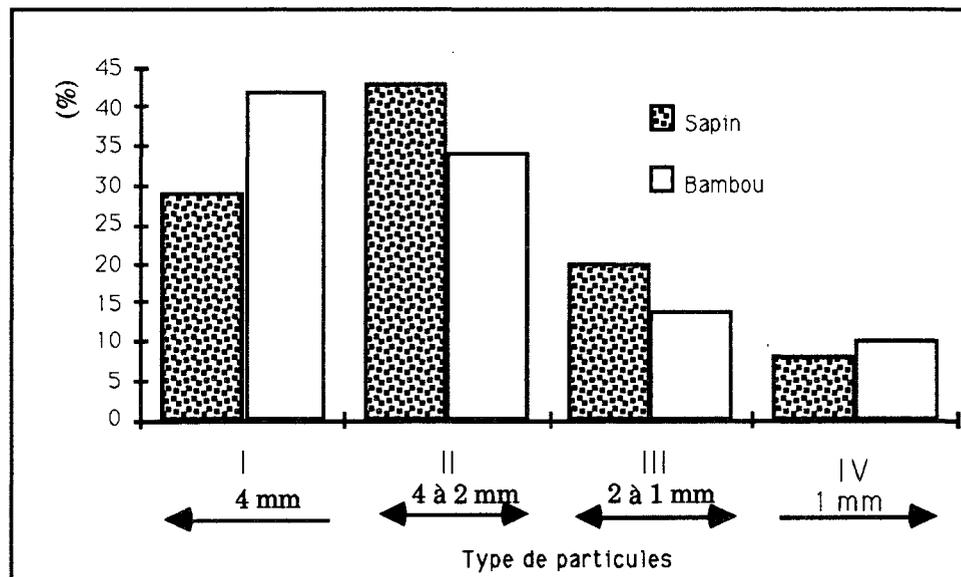


Figure 14- Distribution granulométrique des particules de sapin et de bambou

Les particules ont été classées selon leur largeur moyenne (l_p). De cette manière, les particules du "type I" ont un $l_p > 4$ mm; celles du "type II" présentent un l_p compris entre 2 et 4 mm; le type "III" est constitué par des particules ayant un l_p compris entre 1 et 2 mm. Les fines sont représentées dans le "type IV" ($l_p < 1$ mm). Apparemment, il existe une différence entre la granulométrie du sapin et celle du bambou. Pour le bambou les particules de plus grand diamètre sont les plus nombreuses, alors que pour le sapin la distribution est plus classique.

En dehors de la granulométrie, il faut aussi considérer l'effet de la morphologie des particules. En effet, pour une même distribution granulométrique, on peut trouver des morphologies différentes. Sur la figure 15, on représente la distribution obtenue lors de la répartition de 0,5 g de particules dans un cercle de 6 cm de diamètre.

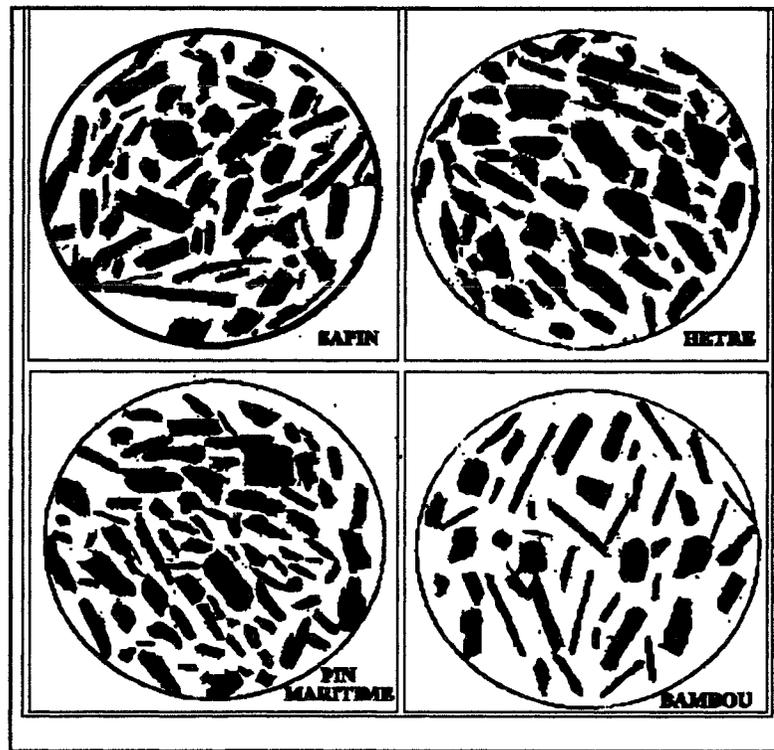


Figure 15- Morphologie des particules (Grossissement 2 fois)

On observe que les trois essences de bois présentent une morphologie voisine. Dans le cas du hêtre, on note une présence plus importante de particules de forme aplatie ou en écailles. En revanche, dans le cas du bambou les particules présentent un aspect tout à fait singulier. On observe de particules aciculaires, qui sont très intéressantes pour stopper les

mécanismes de fissures de la matrice du CBC. De plus, on observe la présence de particules de forme arrondie.

III.3.2 ELIMINATION DES SUBSTANCES INHIBITRICES CONTENUES DANS LE BOIS PAR UN TRAITEMENT A L'EAU

Les études de MOUGEL (1992) ont montré que le sapin est compatible avec le ciment, tandis que le hêtre, de par son comportement chimique, ne l'est pas. Le pin maritime et le bambou ont sensiblement le même comportement. Dans le cas du bambou, la littérature présente des conclusions contradictoires. En effet, SHIMADA (1940) a remarqué que le béton renforcé avec du bambou a des problèmes de durabilité, car la chaux attaque les cellules du bambou, tout en réduisant sa résistance. DATTA (1939), cité par LOPEZ (1974), a conclu qu'il n'y a pas de problèmes de compatibilité chimique entre le bambou et le ciment.

On ne peut pas prendre partie pour l'un ou l'autre de ces auteurs, car ils n'indiquent pas sous quelle forme le bambou a été utilisé. Si on utilise le bambou sous forme de chaumes coupés selon l'axe longitudinal, il offre une surface riche en cellules de parenchyme qui sont sensibles à l'attaque de la chaux. En revanche, si les chaumes sont utilisés directement sous forme cylindrique, la cire contenue dans la couche externe joue un rôle protecteur. Dans ce cas, seules les extrémités ne sont pas protégées et l'attaque est négligeable.

Dans notre recherche, le bambou utilisé sous forme de particules présente une surface spécifique plus importante par rapport au cas du chaume, et doit être fortement attaqué par la chaux. On notera que les particules de bambou ont une odeur sucrée, et on l'on sait que la présence de sucres inhibe la prise du ciment.

D'une manière générale, la littérature indique qu'une immersion dans de l'eau froide durant 2 heures provoque l'élimination d'une grande quantité des extraits du bois. N'ayant pas d'indications précises sur les espèces utilisées (pin maritime, bambou, hêtre), nous avons traité nos échantillons dans de l'eau à 80°C pendant 2 heures, dans un mélangeur (figure 16). Dans le cas de la fabrication industrielle de CBC, il est indispensable de connaître la concentration maximale de sucres, pour que ceux ci n'entraient pas la

prise du ciment. De plus il faudra tenir compte du traitement des eaux résiduelles (HACHMI, 1988).

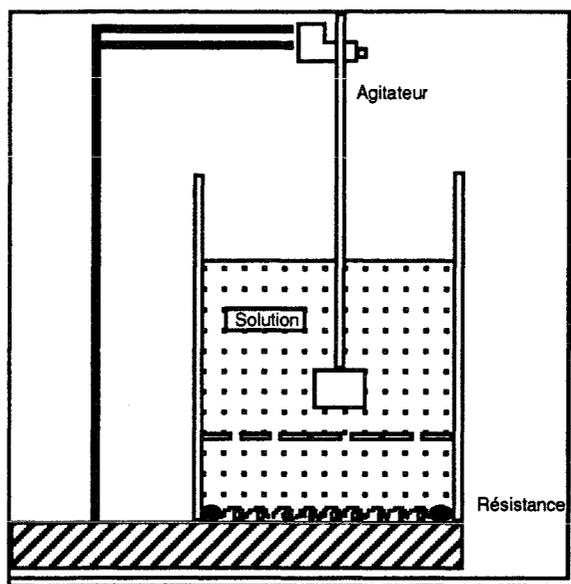


Figure 16- Dispositif de lavage des particules

L'eau est placée dans un bain thermostaté mécaniquement agité. 1 kg de particules de bois est brassé avec 10 l d'eau durant 2 heures à 80°C. Chaque espèce traitée dégage une odeur spécifique. Les particules sont ensuite lavées à l'eau froide jusqu'à ce que l'eau soit claire. Elles sont ensuite laissées sur un tamis durant un jour.

Ce séchage préliminaire est suivi d'un séchage dans un courant d'air préalablement chauffé à 80°C (figure 17). Le séchage est arrêté lorsque la température de l'air à la sortie du lit atteint 40°C. Les particules séchées sont stockées à l'air libre durant deux semaines. L'humidité atteinte, pour les particules du bois, est comprise entre 10 et 15%. Cette humidité est un paramètre important pour l'homogénéité du mélange bois-ciment et pour la qualité finale du CBC.

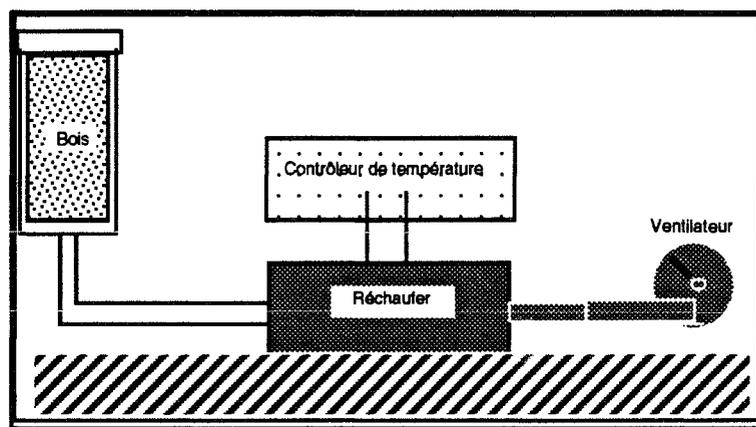


Figure 17- Séchoir à air chaud

Pour l'analyse des sucres extraits par la solution aqueuse, nous avons amélioré le système pour avoir un rapport liquide sur masse de particules constant. Nous avons utilisé le même bain thermostaté dans lequel nous avons immergé un récipient hermétique qui pouvait contenir 100 g de particules de bois ou de bambou (figure 18). Nous avons ainsi pu éviter l'évaporation de l'eau.

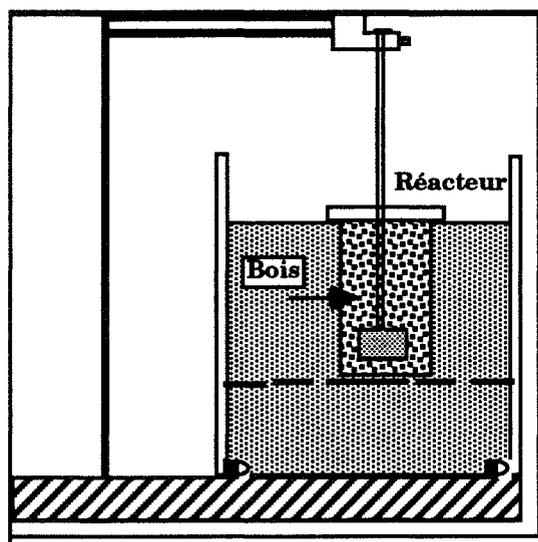


Figure 18- Schéma de l'appareil pour l'extraction des sucres

III.3.3 TRAITEMENTS DES PARTICULES DE BOIS ET DE BAMBOU

Plusieurs auteurs ont affirmé que la seule élimination des substances inhibitrices ne suffisait pas à empêcher les variations dimensionnelles du CBC. MOUGEL (1992) a suggéré de traiter la surface des particules par

pulvérisation de diverses solutions (PEG, huile de vidange, huile de lin, etc.).

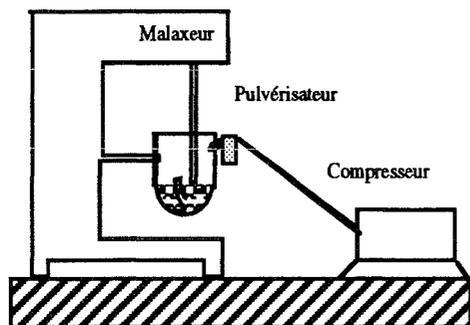


Figure 19- Schéma du dispositif pour la pulvérisation des particules

Les particules sont brassées dans un pétrin de boulanger et on les pulvérise avec un pistolet à peinture. La principale difficulté est d'éviter la mise en oeuvre de solutions trop visqueuses, car cela obstrue la buse du pistolet. Ce dispositif ne permet que de traiter 1 kg de particules (figure 19).

Pour améliorer le traitement, et surtout pour traiter une plus grande

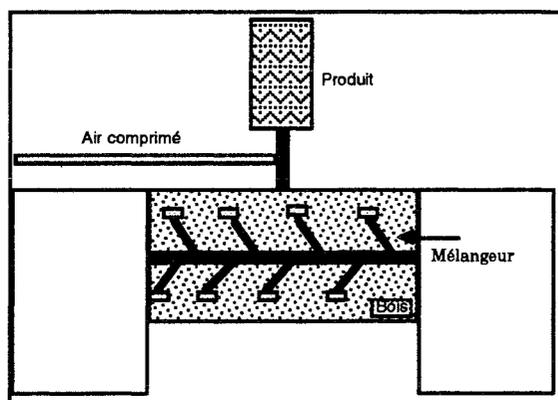


Figure 20- Schéma de la pulvérisation dans l'encolleuse

quantité de particules, nous avons également utilisé une encolleuse (figure 20). Cela nous a permis de préparer 5 kg de particules et d'avoir un mélange plus homogène. Un réservoir de la solution utilisée est placé au dessus de l'encolleuse. Le pulvérisateur à air comprimé projette continuellement la solution sur les particules.

Les particules traitées sont ensuite disposées sur des tamis métalliques, et placées dans un séchoir de dimension plus importante que le précédent, pour un durée de séchage d'environ une heure. Les particules sont ensuite stockées à l'air pendant plus de deux semaines.

III.4 ANALYSE DES EXTRAITS DU BOIS PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE LIQUIDE (HPLC)

Parmi les espèces étudiées (sapin, pin maritime, hêtre, bambou), MOUGEL (1992) a montré que le sapin était compatible avec le ciment. Les essais effectués initialement sur les trois autres espèces n'ont pas donné les résultats escomptés. Toutefois, un lavage à l'eau chaude ou froide, permet de diminuer fortement cette incompatibilité. Les eaux de lavage contiennent des sucres. Pour les identifier et les quantifier, car nous les soupçonnons d'être les principaux responsables de l'inhibition vis à vis du ciment, nous avons utilisé la chromatographie en phase liquide.

Le chromatographe est du type WATERS 510 et les séparations ont été effectuées sur deux colonnes :

- une colonne (AMINEX HPX 87P) en 1992
- une colonne (SUGAR SC 1011 SHODEX) en 1993.

Les conditions opératoires identiques pour les deux colonnes sont :

- débit 0,6 ml/min
- température de la colonne 80°C
- température du détecteur 35°C
- pression de la colonne 1000 PSI
- étalon interne sorbitol

L'utilisation de la seconde colonne permet de réduire le temps de l'analyse.

III.5 PREPARATION DES COMPOSITES BIOMASSE VEGETALE-CIMENT (CBC)

Les proportions choisies sont celles décrites dans l'étude de MOUGEL (1992). Nous avons systématiquement employé le ciment le plus répandu dans la fabrication des CBC à savoir le CPA 55. La quantité de ciment est

fixée à 350 kg par mètre cube de granulat. Les différents granulats utilisés présentent des masses volumiques variables (tableau X).

Espèce	Masse volumique (kg/m³)	Masse volumique (en vrac) (kg/m³)
Sapin	450	180
Pin maritime	600	225
Hêtre	700	250
Bambou	700	250

Tableau X- Masse volumique moyenne des granulats

La masse volumique du granulat dépend de la granulométrie et de l'humidité. La pulvérisation provoque une modification du volume initial du granulat. Pour cette raison il est indispensable pour chaque expérience, de calculer le rapport massique de chaque constituant par mètre cube de granulat.

Les éprouvettes de CBC ont été d'abord fabriquées manuellement. Le ciment ainsi que de l'eau sont mélangés dans un bac à gâcher, on obtient ainsi une pâte très fluide (barbotine) à laquelle on ajoute les particules de bois. On brasse l'ensemble jusqu'à homogénéisation. Comme pour les bétons légers il faut surveiller la quantité d'eau. Cette quantité n'est pas constante car elle dépend de l'espèce, de la granulométrie, ainsi que du traitement effectué. On peut toutefois la situer aux alentours de 400 kg par mètre cube de CBC. Empiriquement, on considère que la quantité d'eau est suffisante quand l'enrobage des particules a un aspect brillant. Grâce à un pétrin de boulanger (figure 19), nous avons pu améliorer l'homogénéisation du mélange. Dans un premier temps, on mélange à sec le ciment et éventuellement les charges minérales pendant environ 3 minutes, puis on ajoute de l'eau dans des proportions déterminées et l'on brasse jusqu'à l'obtention d'une pâte uniforme et homogène (environ 5 minutes). Une quantité d'eau insuffisante est la cause d'un mélange hétérogène, alors que son excès provoque une fluidité importante ne permettant pas de compacter le CBC. Après préparation du mélange ciment - charge minérale et de l'eau,

on ajoute environ 4 litres de particules de bois, et on malaxe durant 5 minutes.

Le mélange final d'environ 3 litres de CBC est réparti dans trois moules (cubes de 100 mm de côté) en PVC, lubrifiés avec une huile de décoffrage. Dans le cas du bambou, on a réduit la taille à un parallélépipède de 80 x 80 x 100 mm, parce que d'une part, l'on ne disposait que de peu de matière première et que d'autre part, dans certains cas, les éprouvettes de 100 x 100 mm dépassaient les capacités de la machine d'essai utilisée (maximum 5 tonnes).

Le mélange dans les trois moules doit être particulièrement bien tassé. On procède par introduction de petites quantités de CBC, que l'on tasse à l'aide d'une spatule.

Une fois préparées, les éprouvettes sont recouvertes d'un couvercle en PVC renforcé de plaques isolantes. Dans l'éprouvette du centre, on introduit un thermocouple qui nous permet de suivre la courbe d'hydratation du CBC. Nous avons systématiquement utilisé l'éprouvette centrale (**T**) pour les essais mécaniques, alors que les deux autres (**R** et **V**) ont servi à l'étude des variations dimensionnelles (figure 21).

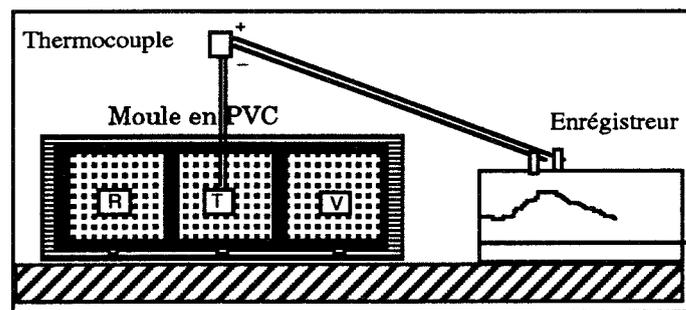


Figure 21- Moulage des éprouvettes

La température atteint son maximum au bout de 14 heures environ. La force nécessaire pour retirer le thermocouple permet d'évaluer la consistance du CBC.

Après démoulage, on enlève les petites aspérités du CBC afin d'obtenir des surfaces homogènes (la face supérieure étant la moins homogène). Les éprouvettes sont stockées à l'air durant une semaine. On procède ensuite à l'écrasement de l'éprouvette **T**, et on démarre les cycles de mesure des variations dimensionnelles sur les éprouvettes **R** et **V**.

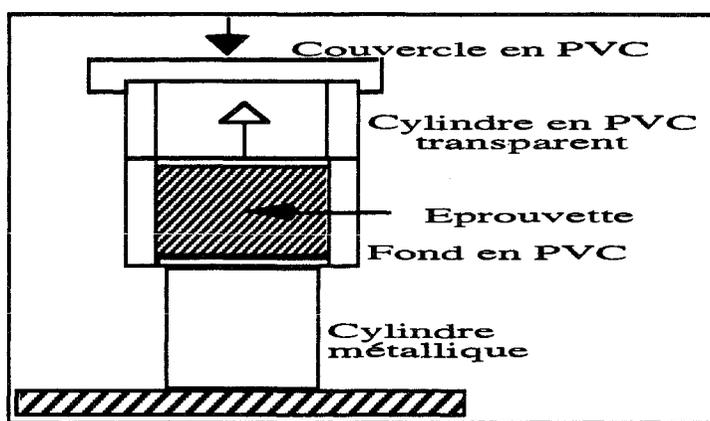


Figure 22 - Dispositif pour le démoulage des éprouvettes cylindriques

Pour les études complémentaires (effet des adjuvants sur le ciment, essais mécaniques non-destructifs (ultrason), carbonatation, compression diamétrale (méthode brésilienne), on a fabriqué des éprouvettes cylindriques, dont le rapport massique est le

même que ceux des éprouvettes cubiques. Les éprouvettes cylindriques sont coulées dans des tubes en PVC de diamètre 53 mm et de 110 mm de hauteur. Le démoulage est effectué à l'aide d'une presse. Le cylindre métallique force le fond du moule, et l'éprouvette monte vers le cylindre en PVC transparent (figure 22). L'utilisation de ce dispositif est intéressant dans le cas de démoulages réalisés sur des éprouvettes fragiles, on évite ainsi une rupture.

III.6 GRANDEURS MESUREES SUR LES EPROUVETTES

Lors de chaque essai, nous avons suivi la température de la réaction d'hydratation, puis nous déterminons la résistance à l'écrasement à l'âge de 7 jours. L'évolution des caractéristiques mécaniques est également suivie à l'aide de la technique non destructive des ultrasons. Nous avons mesuré, selon les deux axes (x et y), la dimension initiale des éprouvettes **R** et **V**.

III.6.1 CARACTERISTIQUES DE LA REACTION D'HYDRATATION

La réaction d'hydratation est suivie en relevant la température maximale atteinte par le mélange, ainsi que le temps nécessaire pour atteindre ce maximum. La température a été mesurée sur l'éprouvette **T** (figure 21). La mesure de la température d'hydratation est très utilisée pour quantifier l'effet des différents adjuvants sur la prise du ciment, et les publications à ce sujet sont nombreuses.

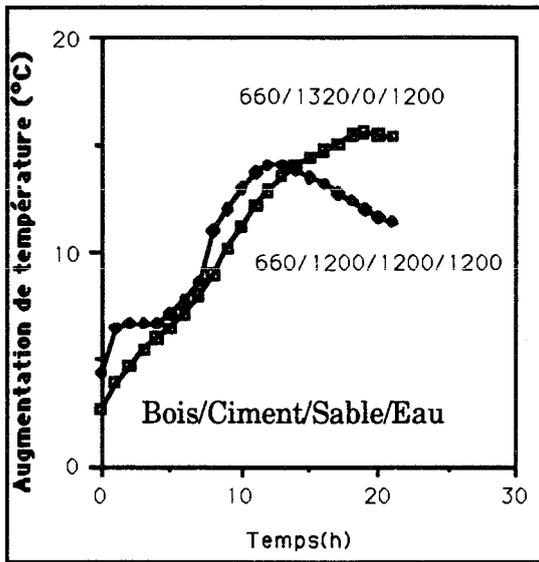


Figure 23- Courbes d'hydratation du CBC

Le maximum de la température est obtenu après environ 14 heures. Ensuite, on observe une diminution lente de la température, car le système utilisé n'est pas parfaitement adiabatique (figure 23).

III.6.2 MESURE DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES DU CBC

La stabilité dimensionnelle des bétons légers est mesurée selon la norme AFNOR 14-304. Les produits étant testés après une période de stabilisation préconisée par le fabricant. Le Centre d'Étude et de Recherches des Industries du Béton manufacturé (CERIB) a adopté l'âge de 28 jours pour débiter les mesures. Les éprouvettes ayant la même constitution sont divisées en deux séries de trois. Sur la première série, on détermine le retrait après un séjour de 21 jours dans une étuve ventilée à 33°C. La deuxième série est utilisée pour les essais de gonflement dans l'eau à 20°C pendant 4 jours.

MOUGEL (1992) a modifié légèrement la norme utilisée par le CERIB. Il a proposé de débiter les essais sur les éprouvettes âgées de 7 jours. L'objectif est de réduire la durée des essais, et d'observer l'influence d'une réduction du temps de stockage du CBC au niveau d'une production industrielle. Après 7 jours, l'éprouvette repérée "R" est placée dans une

enceinte à humidité et température contrôlées respectivement à 50% et 33°C, pendant 21 jours. L'éprouvette "V" est placée dans de l'eau à 20°C pendant 4 jours. On suit les variations des dimensions des éprouvettes sur lesquelles on a placé des plots de mesure (figure 24). On utilise un pied à coulisse de 200 mm, dont la précision est au 1/50 de mm.

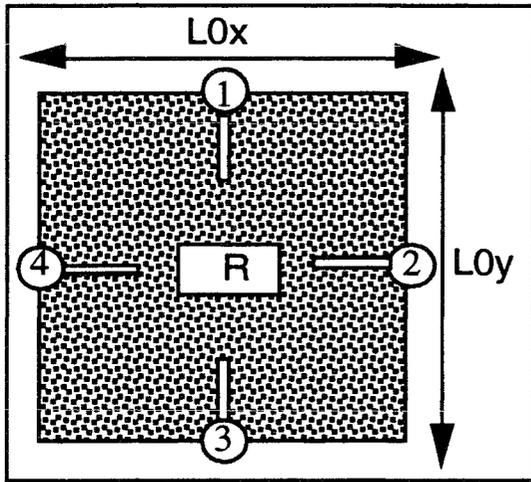


Figure 24 - Schéma de mesure des éprouvettes

Tout d'abord, on mesure les dimensions de l'éprouvette selon l'axe "x" (L_{0x}), ou la distance entre les plots 2 et 4. Puis, on tourne celle-ci de 90° dans le sens horaire, et on mesure selon l'axe "y" (L_{0y}) la distance entre les plots 1 et 3. La face frontale "R" est utilisée par l'identification de l'éprouvette, tandis que la face opposée sert d'appui. On rappelle, que l'axe "1-3" est celui du tassement de l'éprouvette, et que le plot "3" est placé sur la face supérieure de l'éprouvette. Cette face présente un aspect différent

par rapport aux autres. Nous utilisons la moyenne entre ces deux valeurs.

Les dimensions initiales des éprouvettes sont comparées avec celles observées à la fin des cycles dans l'eau ou dans l'enceinte climatique. Le retrait de l'éprouvette **R** est additionné au gonflement de l'éprouvette **V** (figure 25). MOUGEL (1992) a appelé cette somme "cycle 0" (Cy 0). Cette valeur doit être voisine de celle réalisée par le CERIB sur les éprouvettes stabilisées durant 28 jours.

De plus, MOUGEL (1992) a proposé d'évaluer les variations dimensionnelles au cours d'une succession de cycles de séchage-gonflement. Les variations dimensionnelles totales après les deux séries de cycles suivants sont notées "cycle 1" et "cycle 2" (figure 26).

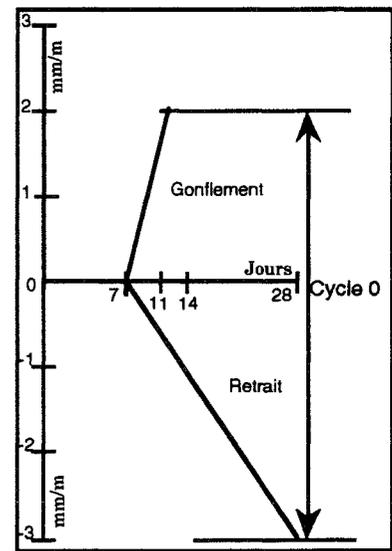


Figure 25- Schéma du "cycle 0"

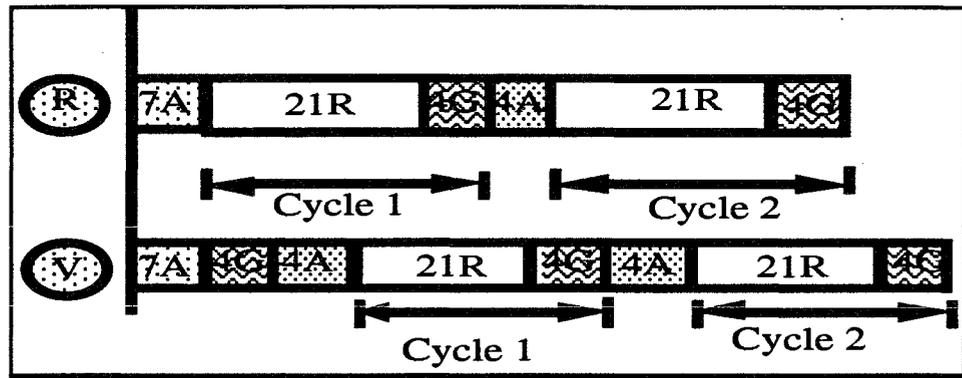


Figure 26- Schéma de des cycles "1" et "2". (A = séchage à l'air, R = retrait dans l'enceinte et G = gonflement à l'eau)

On observe que les éprouvettes "R" et "V" ne sont pas soumises exactement aux mêmes conditions de retrait et de gonflement pendant la durée des essais. Sur les premières, on effectue deux cycles de retrait et deux cycles de gonflement, tandis que sur les secondes on effectue trois cycles de gonflement et deux cycles de retrait. La durée des cycles est donc différente : le deuxième cycle est obtenu après 61 jours, pour les éprouvettes "R", et après 69 jours pour les éprouvettes "V". Cette différence de 8 jours est due au gonflement initial suivi d'une période de séchage à l'air. MOUGEL (1992) a observé que les éprouvettes "V" présentent, en général, une meilleure stabilité dimensionnelle. Il a attribué cette différence au taux d'humidité plus important ce qui améliore la réaction d'hydratation.

L'âge de l'éprouvette, au moment des essais, semble influencer les variations dimensionnelles si on considère séparément le gonflement et le retrait. Pour les éprouvettes âgées de 7 jours, on obtient un retrait relativement élevé car les éprouvettes sont encore humides. En revanche, pour les éprouvettes âgées de 28 jours, on obtient un gonflement plus élevé car les éprouvettes sont relativement sèches.

MOUGEL (1992) a remarqué pour certains CBC, une réduction progressive des variations dimensionnelles obtenues à chaque cycle (Cy 0 > Cy 1 > Cy 2). Toutefois, dans certains cas, il est possible d'observer une dégradation de la matrice, qui provoque un accroissement des variations dimensionnelles. Ce phénomène a surtout été observé dans le cas d'éprouvettes ayant de faibles qualités initiales, dues à la mauvaise prise du ciment.

Lorsque l'on effectue des cycles répétitifs retrait-gonflement, on tend vers une variation dimensionnelle réversible de telle sorte que les

phénomènes irréversibles sont surtout observés au cours du premier traitement.

Pour chacune des préparations des éprouvettes de composite, les valeurs des dimensions et les masses des éprouvettes à la suite des différents cycles de retrait et de gonflement des CBC, sont consignées dans des tableaux identiques (figure 27). Les résultats concernant les masses volumiques et les variations dimensionnelles sont transférés dans un second tableau afin de permettre de faire des comparaisons avec d'autres paramètres de préparation (Annexe III).

Epr	235	DIM	10	DATE	27/09/92	
TYPE	Sapin référence					
GRANULAT SEC (kg/m³)					170	
CIMENT (kg/m³ de granulat)					350	
EAU (kg/m³ de composite)					400	
BOIS (kg/m³ de composite)					220	
t=20,5h		Δ=14,5 °C				
MASSE (g)				R (MPa)		
	DEM	7 JOURS	33 °C	SATURÉE	7 J	>60 J
R	1068	835	770/789	1102/08		-
V	1051	820	771/778	1070/90		-
T	1037	815			3,75(13 j)	
	Init	Gonf 1	Ret 1	Gonf 2	Ret 2	Gonf 3
G1	105,86	105,89	105,46	105,79	105,48	105,79
G2	102,46	102,55	101,98	102,52	102,12	102,54
	Init	Ret 1	Gonf 1	Ret 2	Gonf 2	
R1	105,38	104,96	105,38	105,07	105,34	
R2	103,75	103,18	103,81	103,44	103,80	
Variations dimensionnelles (mm/m)						
G		0,58	4,23	-0,04	3,45	0,06
R		4,74	0,29	2,96	0,05	
	Cy 0=	5,3	Cy 1 =	4,6	Cy 2=	3,3

Figure 27- Fiche des données d'une éprouvette

Le tableau de la figure 27 résume les principales caractéristiques de l'éprouvette, telles que les masses employées, les caractéristiques de la courbe d'hydratation, les masses à la fin de chaque cycle, la résistance mécanique, les dimensions, et les valeurs des variations dimensionnelles des trois cycles. On observe une perte importante de 20% d'eau, dans la première semaine de séchage à l'air libre. Cette eau excédentaire est nécessaire pour l'ouvrabilité au moment du mélange.

III.6.3 MESURE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Les essais mécaniques sont réalisés sur des éprouvettes âgées de 7 jours. Les essais effectués sur des éprouvettes plus âgées donnent des résultats du même ordre, car les CBC, à l'exemple des bétons de granulats légers, ont une vitesse de durcissement beaucoup plus rapide que celle du béton. Cette hypothèse a été vérifiée par la technique des ultrasons sur des éprouvettes cylindriques (annexe IV).

On utilise un rapport massique entre le ciment et la biomasse de l'ordre de 2/1. Dans le cas des CBC fabriqués avec une matrice non-renforcée, MOUGEL (1992) a déterminé une caractéristique mécanique en compression qui se situe entre la limite élastique et la rupture. L'inconvénient avec ces CBC est l'inexistence d'un point bien défini pour la charge maximale (SORFA, 1984).

III.6.3.1 ESSAIS MECANIQUES DESTRUCTIFS

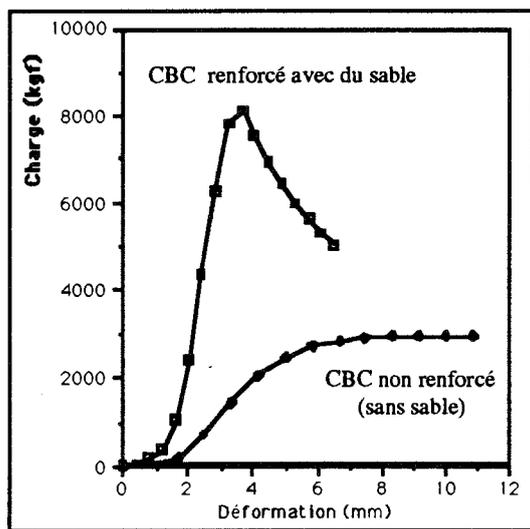


Figure 28- Essai d'écrasement des CBC

Au départ les résistances mécaniques ont été mesurées sur une machine universelle d'essais WOLPERT d'une capacité de charge de 5 tonnes. La vitesse de déplacement utilisée est de 10 mm/minute. Le diagramme charge versus déformation était transcrit sur un enregistreur. La limitation de la charge maximale ne permettait pas la réalisation des essais sur les éprouvettes de CBC d'une matrice renforcée avec du sable. Ces inconvénients ont été éliminés avec l'acquisition par l'ENSTIB, d'une

machine d'essais INSTRON 4206, d'une capacité de charge de 10 tonnes. La vitesse adoptée est également de 10 mm/minute. Cette machine, commandée par un ordinateur, permet la création et la modification des différentes méthodes d'essais. Sur l'écran on peut observer la courbe charge versus déformation, ce qui permet dans la plus grande partie des cas, d'interrompre l'essai au maximum de la charge. Pour des CBC sans renforcement de la

matrice avec du sable, l'essai est interrompu automatiquement au moment où l'on dépasse la déformation maximale (figure 28).

III.6.3.2 ESSAIS MECANIQUES NON DESTRUCTIFS

Les essais mécaniques non-destructifs (fréquence de résonance et vitesse de propagation ultrasonore) ont été réalisés au laboratoire de l'INRA (Champenoux), sous la responsabilité et les conseils de V. BUCUR.

Quelquefois, l'absence de surfaçage des éprouvettes (DURAND, 1975), est responsable de certaines erreurs de mesure du temps de propagation. De même, certaines éprouvettes, principalement dans le cas des matrices non-renforcées, étaient trop fragiles pour supporter le surfaçage. Enfin, le surfaçage peut former une couche superficielle plus dure et la vitesse de propagation obtenue peut, dans ce cas, ne pas être représentative de l'ensemble de l'éprouvette.

Le but principal de ces essais non destructifs a été d'établir une corrélation entre la vitesse de propagation des ondes longitudinales et la contrainte de rupture. Toutefois, cette méthode a été également envisagée pour confirmer les possibles endommagements subis par les éprouvettes, après les essais de variations dimensionnelles.

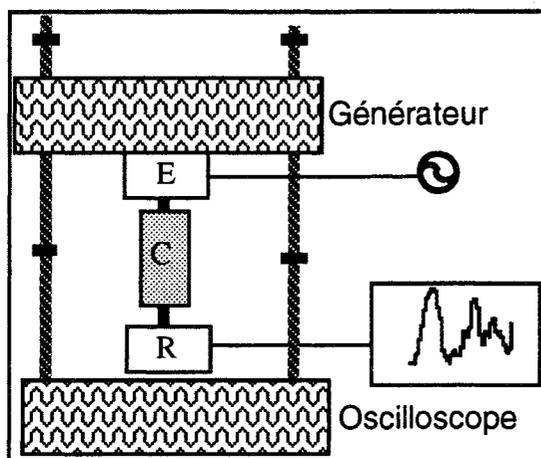


Figure 29- Dispositif pour la mesure du temps de propagation de l'onde

Les éprouvettes, pour les essais de propagation des ondes, sont placées dans un dispositif (figure 29) permettant le positionnement de l'ensemble émetteur (E), éprouvette (C), récepteur (R).

Pour améliorer le contact entre l'éprouvette l'émetteur et le récepteur, on utilise un gel chirurgical aux points de contact. On considère que la probable absorption du gel par le composite ne change pas de façon significative les résultats obtenus.

Le temps de propagation de l'onde est déterminé à l'aide d'un ausculteur dynamique AU 80 (SATTEC). Il est nécessaire d'étalonner l'appareil en mesurant le temps de retard. Cette valeur représente le temps de propagation de l'onde lorsque l'émetteur et le récepteur sont mis en contact direct. Cette valeur, de l'ordre de $7 \mu s$, doit être soustraite du temps de propagation obtenu sur les éprouvettes.

La vitesse de propagation (m/s) est obtenue en divisant la distance traversée par l'onde par le temps de propagation corrigé.

Le module dynamique et le coefficient de Poisson sont calculés, dans le cas du béton, à partir des relations rappelées précédemment. Toutefois, certains auteurs ont souligné les inconvénients liés à l'utilisation de ces relations dues en grande partie aux dimensions réduites des éprouvettes. FACAOARU nous a suggéré d'obtenir le module dynamique à l'aide de la fréquence de résonance sur des éprouvettes de 40x40x400 (mm). Dans le cas de cubes de 100 mm de côté, il considère qu'il est plus prudent d'utiliser seulement les vitesses de propagation. Pour les éprouvettes cylindriques de petites dimensions, il n'est pas certain qu'on puisse obtenir la fréquence de résonance*.

La méthode de la fréquence de résonance a été mise en oeuvre sur quelques éprouvettes en CBC, en béton et en mortier. Le dispositif comprend un microphone et un oscilloscope 9314M Lecroy Quad (300 MHz). La fréquence de résonance a été mesurée par D. HAYNES (1993) sur des éprouvettes de dimensions 40x40x400 mm.

* Communication personnel, UNESCO-Paris (1993)

III.7 CARBONATATION DES EPROUVETTES DE CBC

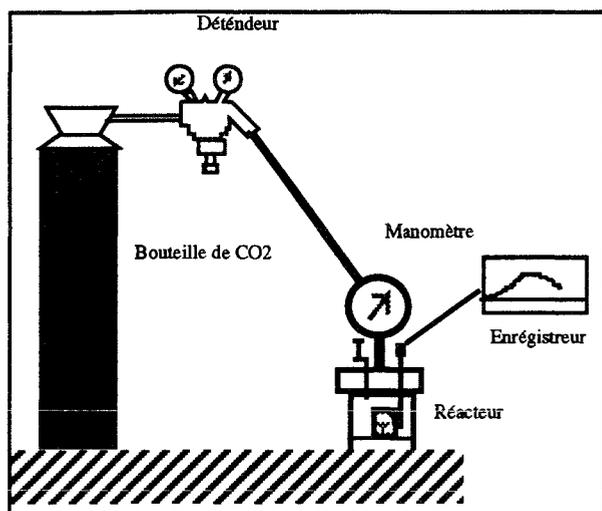


Figure 30- Schéma du réacteur pour la carbonatation des éprouvettes cylindriques

Les premiers essais de carbonatation avec du gaz carbonique ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques d'un diamètre égal à 53 mm et de 110 mm de hauteur. On les place sur une grille métallique dans un réacteur, puis on fait un vide à l'aide d'une trompe à eau pendant 10 minutes. Ensuite, on balaye le réacteur avec du CO₂ pour le purger, et on ferme le robinet de sortie. On laisse monter la pression du gaz jusqu'à une pression relative de 0,5 bar. Un thermocouple permet

de suivre la température de la réaction, qui atteint son maximum aux alentours d'une heure. On utilise des pressions relatives de CO₂ de 0,5 et 1 bar (figure 30).

Suite à ces études, les expériences de carbonatation ont été réalisées sur les éprouvettes cubiques de 100 mm de côté. Ces dernières sont placées dans une enceinte où la pression relative de CO₂ a été maintenue constante (0,5 bar). Les paramètres modifiés sont le temps de carbonatation (1 et 8 heures), l'humidité initiale de l'éprouvette et le conditionnement ultérieur à l'issue de l'opération de carbonatation. Comme nous le verrons ci-après, l'objectif de la carbonatation est de diminuer la durée de l'étape de stabilisation dimensionnelle du CBC.

Dans l'annexe IV nous présentons une analyse des propriétés mécaniques des différents CBC.

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX

IV.1 INTRODUCTION

L'étude bibliographique a mis en évidence les effets inhibiteurs de certaines substances libérées par le bois pour la prise du ciment et décrit certains procédés de traitement permettant de limiter ces effets inhibiteurs et donc d'améliorer les propriétés mécaniques des composites. La plupart de ces études porte sur la fabrication de panneaux comprimés et sur l'étude de leurs caractéristiques mécaniques. En ce qui nous concerne, notre recherche s'est plutôt centrée sur la fabrication de blocs non comprimés et sur l'étude de leurs variations dimensionnelles. En effet, un de nos objectifs est l'utilisation de ces blocs en construction extérieure sans revêtement particulier permettant leur protection vis à vis des variations d'humidité du milieu extérieur.

A la suite de la recherche d'E. MOUGEL, qui avait abouti à un protocole de préparation du composite comportant plusieurs étapes, nous avons voulu reprendre ces différentes étapes en recherchant d'une part à les appréhender sur le plan physico-chimique, et d'autre part, à les optimiser afin d'atteindre l'objectif visé, avec des coûts raisonnables et quelle que soit la nature de la biomasse végétale associée au ciment.

IV.2 INFLUENCE DE LA BIOMASSE VEGETALE SUR LA PRISE DU CIMENT- MODES DE TRAITEMENT- INFLUENCE SUR LES BIOMASSES ETUDIEES

Avec des particules de sapin, la prise du ciment est retardée mais la réaction d'hydratation est suffisante pour conduire à un composite dont la résistance à l'écrasement (notée MOR) dépasse 3 MPa.

En revanche, des essais effectués avec des particules de bambou fraîchement coupées sont décevants. Au mois de Février 1991, la Bamboueraie d'Anduze nous a fourni gracieusement des chaumes verts de l'espèce *Phyllostachys viridis*. Avec ces chaumes, nous avons réalisé des éprouvettes de dimensions 80 x 80 x 100 mm dénommées C. Certains des résultats sont donnés dans le tableau XI et on pourra trouver en annexe III d'autres essais effectués sur d'autres espèces de bambou. La contrainte de

rupture (**MOR**) est en MPa, la masse volumique (**MV**) est en kg/m³, et les différentes variations dimensionnelles (**Cy 0**, **Cy 1**, et **Cy 2**) sont en mm/m. Les quantités (en kg) de chaque composant par mètre cube de composite sont notées **B** (bois), **C** (ciment) et **E** (eau).

Ep	Traitement	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C01	humide	460	429	300	620	0,3	6,5	-	-
C02	sec	391	364	323	-	0,3	-	-	-
C03	humide	469	364	208	680	0,4	16,8	12,5	9,7
C04	sec	344	364	323	590	0,2	14,0	10,4	6,1
C05	sec	312	391	292	690	0,2	10,3	13,0	8,5
C06	sec	302	417	323	730	0,3	-	11,8	5,8

Tableau XI- Éprouvettes réalisées avec le bambou *Phyllostachys viridis* humide (80%) et séché à l'air (15%)

Avec des particules de bambou humide (**C01** et **C03**) ou avec les particules séchées à l'air chaud (**C02**, **C04**, **C05**, **C06**) les éprouvettes présentent des résistances à l'écrasement inférieures ou égales à 0,4 MPa et des variations dimensionnelles supérieures à 5 mm/m. L'éprouvette **C02** s'est même désintégrée lors de son démoulage.

Ainsi, l'utilisation de particules de bambou nous a confirmé la nécessité de faire subir un prétraitement à la biomasse avant sa mise en contact avec le ciment. Nous avons envisagé tout d'abord les traitements que nous qualifierons de "naturels" puis des traitements physiques contrôlés, les premiers n'ayant pas donné les résultats escomptés. Compte tenu du caractère très inhibiteur des particules de bambou, ces traitements et leur développement ont été étudiés essentiellement sur les particules de bambou.

IV.2.1 TRAITEMENTS NATURELS DES PARTICULES

Après déchiquetage des chaumes de bambou, les particules sont stockées soit à l'air libre, soit dans une enceinte hermétique. Dans le premier cas, on observe une évaporation de l'eau et d'après certains auteurs, des transformations de certaines substances. Dans le deuxième cas, on assiste à une dégradation biologique des particules par des mécanismes de fermentation. Les résultats obtenus avec ces particules sont résumés dans le tableau XII.

Ep	Type	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C10	fermenté-sec 90°C	312	458	354	790	0,3	20,4	9,1	10,9
C11	fermenté-sec 90°C	312	458	312	730	0,3	12,7	9,7	5,9
C12	fermenté-sec 90°C	312	458	255	-	-	-	-	-
C20	sec à l'air	312	458	307	820	<0,5	-	-	-
C21	sec à l'air	312	458	307	770	-	-	-	-
C24	sec-tamis 30	300	467	297	-	-	-	-	-
C25	sec-tamis 38	300	467	247	-	-	-	-	-
C37	sec à l'air	297	479	312	750	0,3	13,4	20,9	12,1
C38	sec à l'air	312	479	260	780	0,6	15,9	24,0	9,9

Tableau XII- Éprouvettes réalisées avec le bambou séché plusieurs mois et fermenté

Avec les particules fermentées, les éprouvettes (C10, C11, C12) ne présentent aucune résistance mécanique. Ces résultats sont en contradiction avec ceux rapportés par SCHWARZ (1988) et par BIBLIS et LO (1968) qui ont constaté une amélioration des CBC après l'attaque des particules par des champignons. En revanche, nos résultats sont similaires à ceux trouvés par WEATHERWAX et TARKOW (1964, 1967).

Pour les particules stockées à l'air durant deux mois (C20, C21) et trois mois (C37, C38, C24, C25), les éprouvettes restent encore de mauvaise qualité et ceci quelle que soit la dimension et l'homogénéité des dimensions des particules.

En définitive, dans le cas du bambou étudié, les traitements naturels ne sont pas suffisants pour réduire leur caractère inhibiteur vis à vis du ciment. Des essais effectués avec d'autres bambous stockés durant plusieurs mois montrent que la prise du ciment s'améliore mais dans tous les cas la résistance à l'écrasement reste faible et les variations dimensionnelles élevées.

IV.2.2 TRAITEMENTS PHYSIQUES DES PARTICULES

L'inhibition du ciment est due à certains constituants de la biomasse végétale et le traitement physique le plus simple consiste à une extraction de ces produits par un solvant approprié. Compte tenu des travaux de la littérature et de l'aspect économique nous avons opté pour l'eau et cherché à appliquer la technique d'extraction par l'eau aux particules de bambou.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau XIII. Les paramètres modifiés sont la durée d'extraction et la température de l'eau.

Ep	Traitement	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C35	20°C-1 h	286	477	310	780	0,6	5,3	11,6	7,5
C13	20°C-12 h	312	458	323	900	4,6	7,0	4,4	2,4
C81	20°C-12 h	296	474	324	890	4,6	6,3	4,3	2,9
C30	20°C-24 h	312	521	365	920	4,1	7,2	5,1	3,8
C87	20°C-24 h	295	432	295	870	4,3	6,2	5,9	4,3
C43	20°C-72 h	297	490	339	930	3,9	3,8	4,2	3,2
C29	60°C-1 h	312	521	365	890	2,4	4,5	4,0	4,2
C36	60°C-2 h	292	477	312	840	4,2	6,8	6,1	4,2
C33	80°C-0,5 h	312	521	338	830	2,3	8,1	6,0	4,4
C07	80°C-1 h	312	408	401	850	3,8	6,7	5,4	3,5
C31	80°C-1 h	312	521	338	870	2,3	5,9	5,6	4,3
C08	80°C-1 h	312	458	438	780	3,7	7,3	5,4	4,0
C18	80°C-1 h	292	458	458	870	2,9	3,5	2,4	2,8
C34	80°C-1,5 h	312	521	338	850	3,9	7,7	6,3	2,9
C32	80°C-2 h	312	521	338	900	5,1	7,1	5,2	2,7

Tableau XIII- Éprouvettes réalisées avec le bambou traité à l'eau

A une température de 20°C, une durée de traitement de 1 h est insuffisante. Toutefois, au delà d'une durée de 12 h, on observe aucune amélioration et même une diminution des qualités recherchées. Ce phénomène est peut être du à l'attaque biologique des particules mise en évidence par le dégagement d'une odeur désagréable au dessus de la solution.

Lorsque l'on augmente la température de la solution, une durée de traitement de 1 h est suffisante, mais globalement les résultats obtenus ne sont guère plus intéressants que ceux obtenus avec le traitement à l'eau à 20°C. Ainsi, compte tenu de l'aspect économique, le traitement à froid devra être choisi préférentiellement à ce stade de l'étude.

Les essais précédents confirment qu'une partie au moins des produits inhibiteurs de la prise du ciment est soluble dans l'eau. Cette extraction peut dépendre, en particulier, de la taille des particules et du pH de la solution. Nous avons donc cherché à préciser l'influence de ces deux paramètres.

IV.2.2.1 INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES

Pour les particules non traitées, l'influence de la taille est visible sur les échantillons. Pour les particules de taille réduite (poudre), les éprouvettes présentent des tâches importantes sur les surfaces latérales (figure 31 a). En revanche, pour les plus grosses particules les tâches sont plus petites et liées par des filaments (figure 31 b).

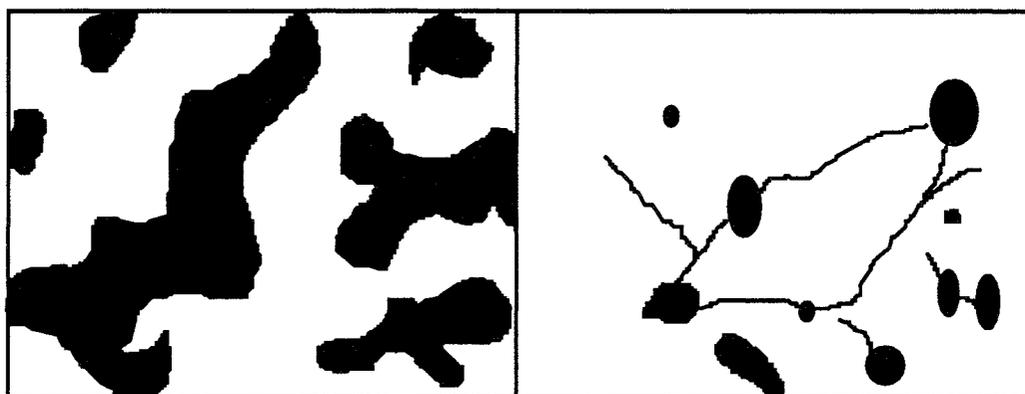


Figure 31 a) Bambou en poudre

b) Bambou en particule

(< 0,5 mm)

(> 5,0 mm)

Une analyse du ciment au voisinage des tâches montre que la matrice est friable confirmant une action inhibitrice du bambou dans ces régions. Dans le cas du bambou en poudre, on aurait pu s'attendre à ce que le phénomène apparaisse sur toute la surface, mais l'hétérogénéité observée est peut être liée au mauvais mélange entre la poudre de bambou et les particules de ciment, les tâches étant formées essentiellement dans les zones riches en bambou.

Une autre méthode permettant de quantifier l'influence de la poudre de bambou sur la prise du ciment est le suivi de la réaction d'hydratation dans un calorimètre. Ainsi nous suivons la variation de la température d'un mélange placé dans un calorimètre constitué par 1000 g de ciment, 400 ml d'eau et une masse variable de poudre de bambou. Sur la courbe expérimentale nous mesurons la variation de température ΔT_{\max} et le temps correspondant. Les valeurs obtenues en fonction de la masse de poudre de bambou sont données sur la figure 32.

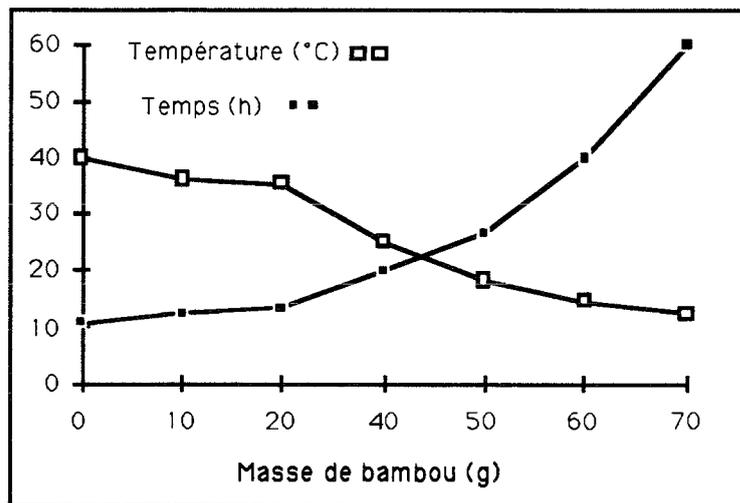


Figure 32- Influence de la masse de poudre de bambou non traité sur les caractéristiques de la réaction d'hydratation du ciment (1 kg)

Avec une masse de 70 g de bambou (7% en masse par rapport au ciment pur) le temps maximum est multiplié par 6 et la différence de température divisée par 4. On peut donc imaginer l'effet destructeur de la sciure de bambou lorsque sa masse représente 50% de celle du ciment (quantité normalement utilisée dans la fabrication des CBC).

Si désormais on s'intéresse aux particules traitées on peut penser qu'à conditions de traitement identiques, les éprouvettes réalisées puissent avoir des caractéristiques différentes en fonction de la dimension des particules.

Les particules de bambou non traitées sont tamisées et réparties en 5 classes. Après les avoir traitées à l'eau à 80°C durant 2 heures, les éprouvettes fabriquées à partir des lots de particules conduisent à des composites dont les grandeurs caractéristiques sont données dans le tableau XIV.

Ep	Traitement	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C76	A (> 5 mm)	301	442	301	840	2,0	9,7	8,2	6,1
C77	B(3,2 à 5 mm)	293	431	293	830	3,8	4,8	6,1	5,0
C78	C(2 à 3,2 mm)	283	416	283	800	3,6	7,1	7,1	4,5
C79	D(0,8 à 2 mm)	274	402	274	770	3,1	7,9	7,3	5,3
C80	E(< 0,5 mm)	279	406	372	790	2,3	9,7	8,4	5,2

Tableau XIV- Influence de la taille des particules de bambou traité

Les éprouvettes confectionnées avec les grosses particules (largeur > 5 mm) ou avec les petites particules (largeur < 0,5 mm) ont les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles les plus faibles. Les raisons ne sont pas identiques. Pour les petites particules l'extraction est plus poussée mais la présence du végétal dans le composite sous forme de poudre n'est pas favorable. En revanche, la présence de particules de grande dimension est favorable du point de vue mécanique dans le composite, mais le lavage n'est peut être pas suffisant. Ainsi, dans nos conditions opératoires, les meilleurs résultats ont toujours été obtenus pour des particules dont les dimensions restent comprises entre les tamis 36 (maille de 3,15 mm) et 34 (maille de 2 mm).

IV.2.2.2 INFLUENCE DU PH DU MILIEU

En présence d'eau le ciment Portland conduit à un milieu fortement basique. Nous avons donc voulu connaître l'influence d'un milieu aqueux basique sur l'extraction des produits inhibiteurs du bambou. Les bambous ont été immergés dans des solutions d'hydroxyde de sodium (4 g/l) et des suspensions d'hydroxyde de calcium (4 g/l). Les résultats obtenus pour les éprouvettes réalisées à partir de ces particules traitées sont résumés dans le tableau XV.

Ep	Type	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C14	NaOH-20°C	312	458	406	860	3,8	5,7	4,8	4,2
C23	Ca(OH) ₂ -20°C	312	458	425	850	3,7	6,0	6,2	3,3
C39	NaOH-60°C	307	510	365	860	2,3	9,9	7,5	3,2
C40	NaOH-80°C	292	479	312	850	0,8	10,3	10,5	4,2
C44	NaOH-80°C	276	443	312	750	0,8	4,8	8,0	5,4

Tableau XV- Influence du traitement des particules de bambou par une solution ou une suspension basique

En milieu basique l'extraction semble plus rapide mais un traitement plus poussé à 80°C, avec l'hydroxyde de sodium, conduit à des performances inférieures.

En définitive, les traitements avec une phase aqueuse basique ne semblent pas utiles, un lavage à l'eau froide des particules de bambou et plus généralement du bois permet une prise du ciment, car une partie des produits inhibiteurs est probablement transféré dans la phase aqueuse. Dans le paragraphe suivant, nous allons confirmer ce point et préciser de manière qualitative et quantitative l'influence de certaines substances sur la prise du ciment.

IV.2.3 ETUDE DE L'EAU DE LAVAGE DES PARTICULES DE BAMBOU

IV.2.3.1 ROLE INHIBITEUR DE L'EAU DE LAVAGE

L'eau de lavage des particules de bambou est utilisée pour préparer un composite à base de sapin. Rappelons que le sapin est une espèce chimiquement compatible avec le ciment (la résistance à l'écrasement du composite dépasse généralement 3 MPa).

Les composites sont fabriqués en maintenant la masse de particules de sapin (220 g), la masse de ciment (400 g) et en ajoutant la solution de lavage des bambous à l'eau de gâchage jusqu'au remplacement total de celle-ci (400 ml). Si on suit les résistances à l'écrasement en fonction de la fraction massique d'eau de lavage (figure 33), on constate qu'au delà d'une fraction de 15% la résistance décroît rapidement et à partir de 50%, on retrouve des CBC dont les caractéristiques mécaniques sont du même ordre de grandeur que celles observées avec les particules de bambou non traité. Cette série d'essais confirme donc que le lavage à l'eau des particules de bambou permet d'éliminer des produits inhibiteurs de la prise du ciment. Dans ce qui suit, nous avons cherché à identifier certains des produits des eaux de lavage et à vérifier leur caractère inhibiteur vis à vis de la prise du ciment.

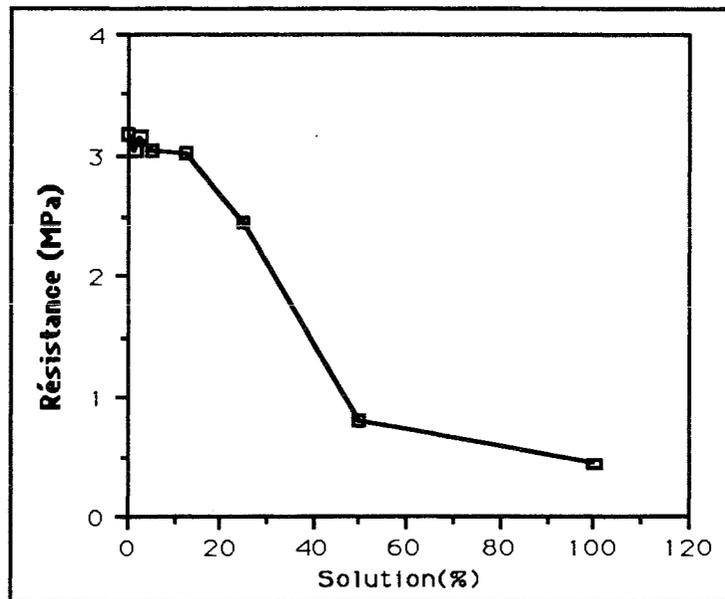


Figure 33- Influence de l'eau de lavage des particules de bambou sur la résistance à l'écrasement du composite sapin-ciment (échantillons T)

IV.2.3.2 ANALYSE DES EAUX DE LAVAGE PAR CHROMATOGRAPHIE LIQUIDE HAUTE PRESSION (HPLC)

Les solutions de lavage de 100 g de particules de bambou dans 1 litre d'eau à 80°C sont analysées par HPLC sur une colonne SHODEX en utilisant comme éluant de l'eau bidistillée et comme étalon interne le sorbitol.

La figure 34 représente un chromatogramme typique obtenu dans le cas des eaux de lavage du bambou *P. viridis*.

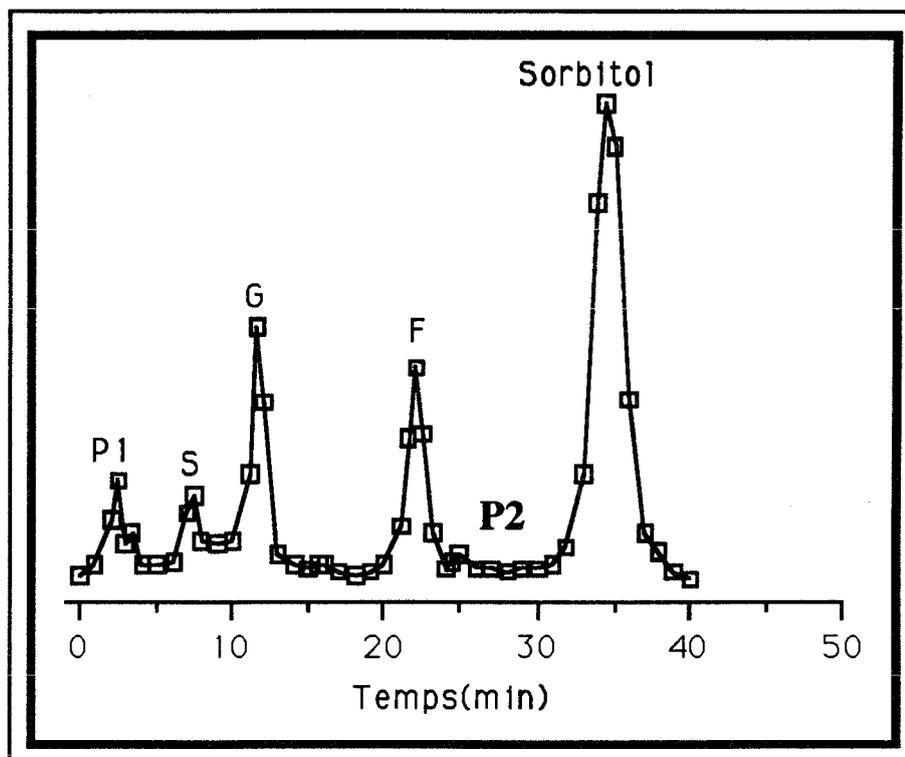


Figure 34- Chromatogramme des eaux de lavage du bambou *P. viridis*

Nous avons identifié le saccharose (noté **S**), le glucose (noté **G**) et le fructose (noté **F**). Nous observons ainsi deux autres produits en plus faible quantité (notés **P1** et **P2**) que nous n'avons pas réussi à identifier.

Remarques:

1- Les analyses précédentes nous ont confirmé que le stockage des particules de bambou à l'air libre permettait de réduire la quantité extraite de produits inhibiteurs. En effet, sur la figure 35, nous avons rapporté les concentrations de saccharose, glucose et fructose obtenues dans les solutions de lavage ($t= 1$ et 2 h) des particules en 1992 et en 1993 soit après une année de stockage.

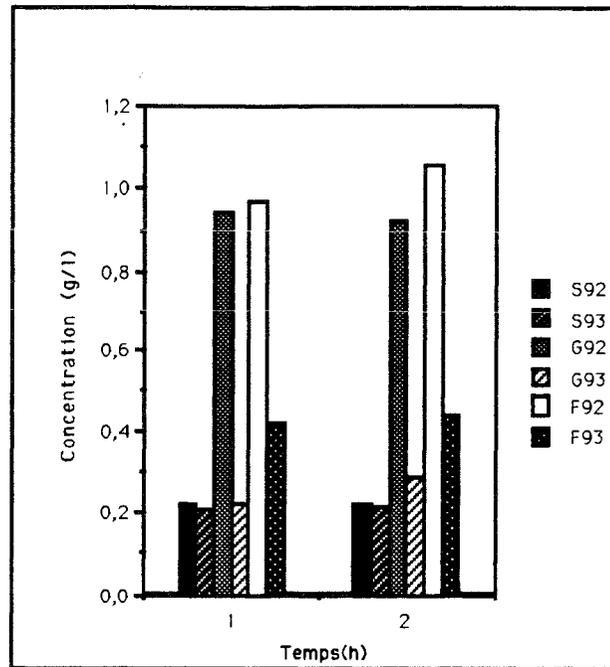


Figure 35- Influence du stockage des particules de *P. viridis* sur les concentrations en sucres des eaux de lavage

La concentration de saccharose dans les eaux de lavage est du même ordre de grandeur. En revanche, on observe une diminution nette des concentrations de glucose et de fructose.

2- Quelle que soit l'espèce de bambou, on retrouve dans les eaux de lavage les trois sucres, mais la concentration dépend de l'espèce et pour une espèce donnée (*P. viridis*) de la zone du chaume dans laquelle sont prélevées les particules. La figure 36 résume les résultats obtenus pour le *P. viridis* (noté **PV**), les espèces brésiliennes *B. tuldoides* (noté **BT**) et *D. giganteus* (noté **DG**) et la couche extérieure de *P. viridis* (noté **PVE**). Pour le *P. viridis*, la proportion de saccharose dans les particules de la couche extérieure est beaucoup plus élevée. Pour les trois espèces de bambous, il est difficile de tirer une conclusion dans la mesure où les périodes de stockage des chaumes n'étaient pas identiques. On peut toutefois noter que les concentrations de saccharose sont voisines.

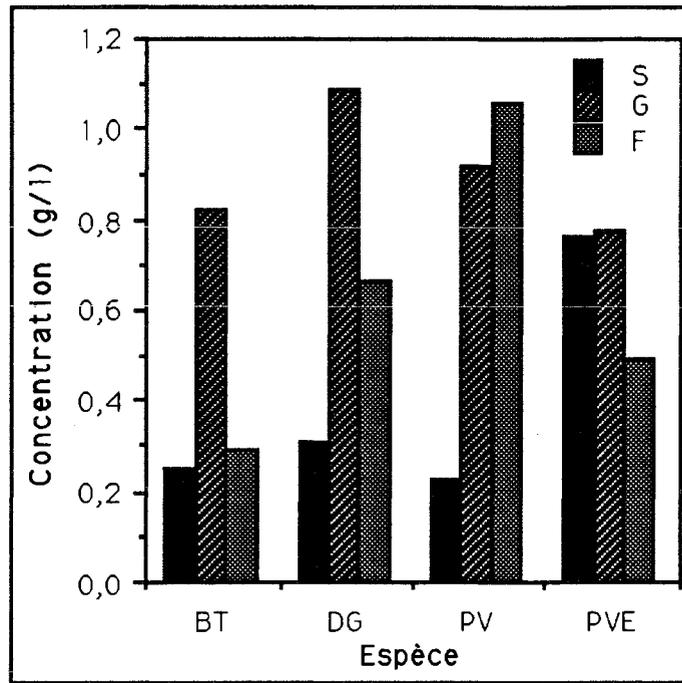


Figure 36- Analyse des sucres dans les eaux de lavage de différentes espèces de bambou: BT= *Bambusa tuldoides* DG= *Dendrocalamus giganteus* PV= *Phyllostachys viridis* PVE= *P. viridis* (couche externe)

IV.2.3.3 INHIBITION DE LA PRISE DU CIMENT PAR LE SACCHAROSE, LE GLUCOSE ET LE FRUCTOSE

Des éprouvettes sont tout d'abord réalisées en mélangeant 360 g de ciment, 90 ml d'eau distillée et 0,36 g de l'un de trois sucres. Les éprouvettes sont réalisées dans un moule cylindrique isolé. L'évolution de la température de la réaction d'hydratation est suivie grâce à un thermocouple plongeant dans l'éprouvette. Les variations de température observées pour le ciment seul et pour le ciment additionné de 0,1% de sucre sont reportées sur la figure 37.

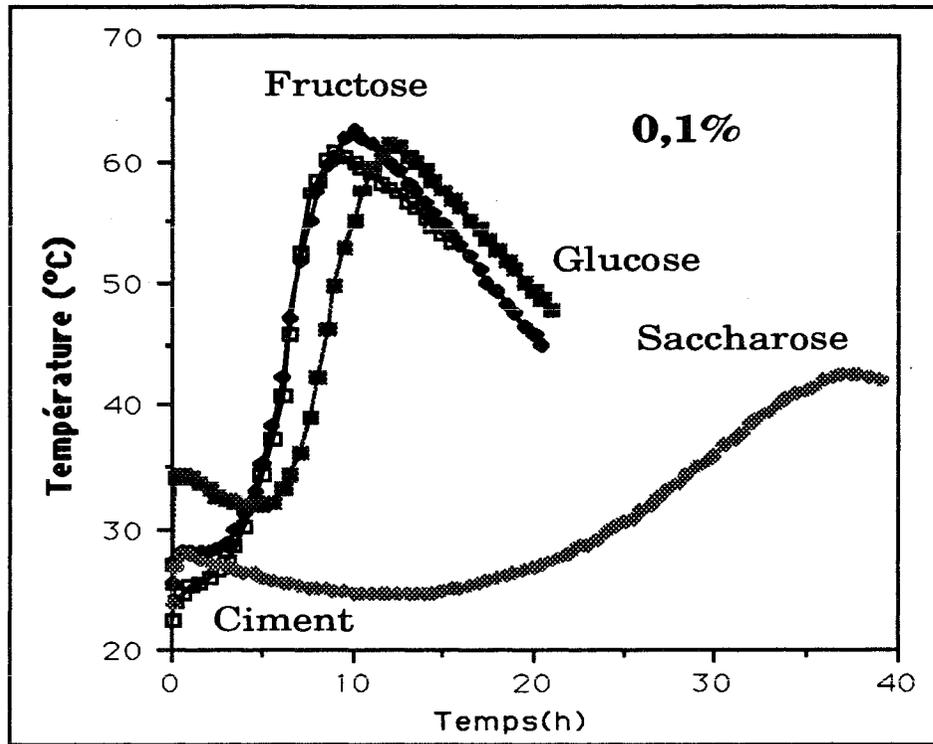


Figure 37- Influence des sucres sur la réaction d'hydratation du ciment

Pour une concentration de 0,1% en masse de sucre par rapport au ciment, l'effet inhibiteur du fructose et du glucose est négligeable. En revanche, le saccharose a un comportement tout à fait différent et retarde notablement la prise du ciment.

L'effet non inhibiteur du fructose est en réalité lié à sa très faible concentration. En effet si l'on augmente la concentration de fructose au delà d'un rapport massique égal à 0,4%, on n'observe plus de température maximale caractéristique de l'hydratation (figure 38).

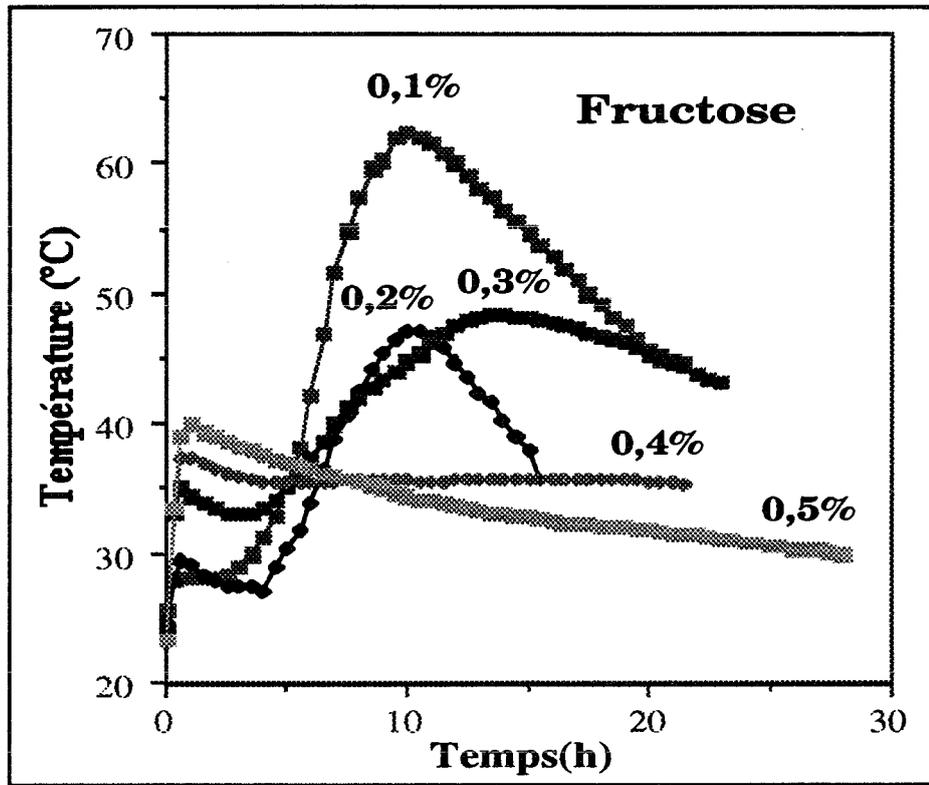


Figure 38- Influence de la concentration en fructose (%) sur la courbe d'hydratation du ciment

Notre calorimètre n'étant pas parfaitement adiabatique et ne permettant donc pas une mesure de la chaleur d'hydratation du ciment, nous avons cherché à préciser les effets inhibiteurs sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes que l'on peut atteindre par un test d'écrasement ou par l'intermédiaire de la vitesse de propagation d'une onde sonore.

Les résultats des résistances à l'écrasement mesurées sur des éprouvettes d'un âge supérieur à 28 jours en fonction du rapport massique en sucre sont donnés sur la figure 39.

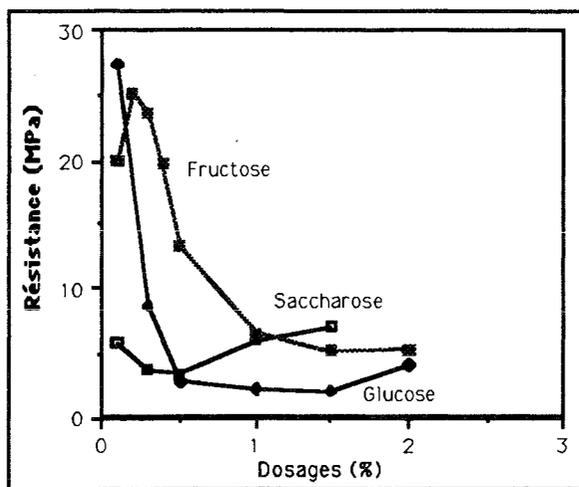


Figure 39 - Effet du dosage des sucres pour rapport au ciment

Ces résultats sont confirmés par les mesures de vitesse de propagation d'une onde sonore. Dans ce dernier cas, on peut suivre au cours du temps la vitesse de propagation. Les résultats obtenus en fonction des concentrations de fructose, glucose, saccharose, et des mélanges deux à deux sont donnés sur les figures 40 a, 40 b, 40 c et 40 d.

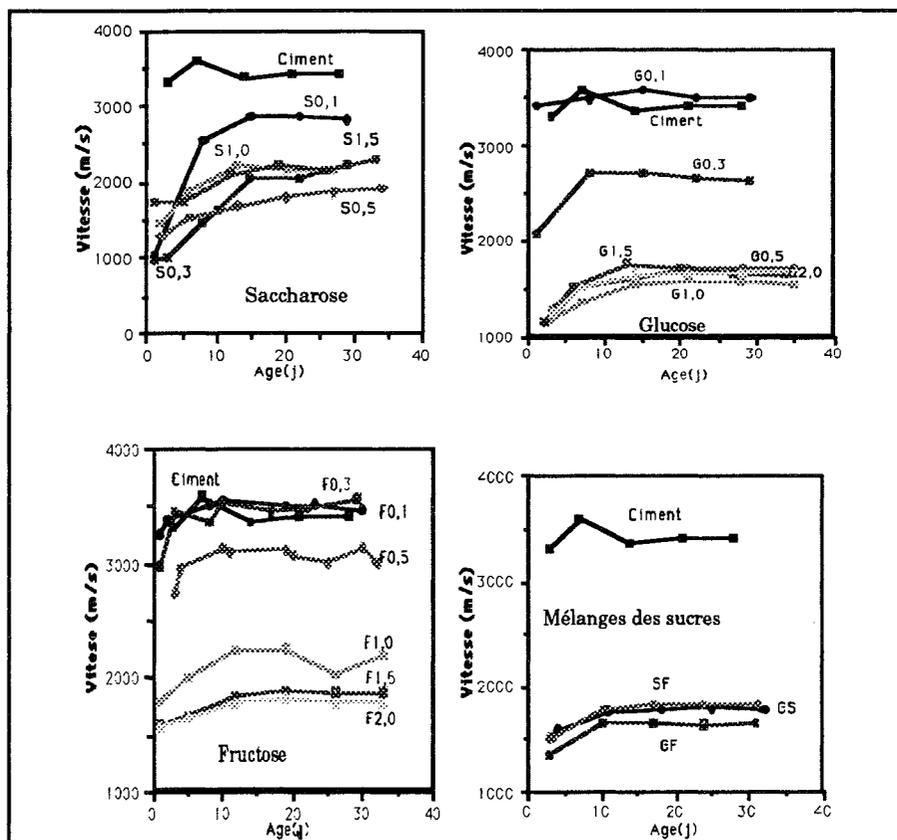


Figure 40 - Influence du temps et de la concentration de sucres sur la vitesse de propagation d'onde sonore

Au delà d'un âge de 15 à 20 jours, la vitesse de propagation devient constante quelle que soit la teneur et la nature du sucre. Si on examine ces valeurs limites avec les résistances à l'écrasement mesurées sur une éprouvette identique d'un âge supérieur à 28 jours, on constate une très bonne corrélation (voir figure 41) du type:

$$\text{MOR} = 0,57 \exp(1,05 \cdot v)$$

La valeur du coefficient 1,05 est proche de celle utilisée pour le béton au Pays Bas et en Roumanie (1,1), selon JONES et FACAOARU (1969).

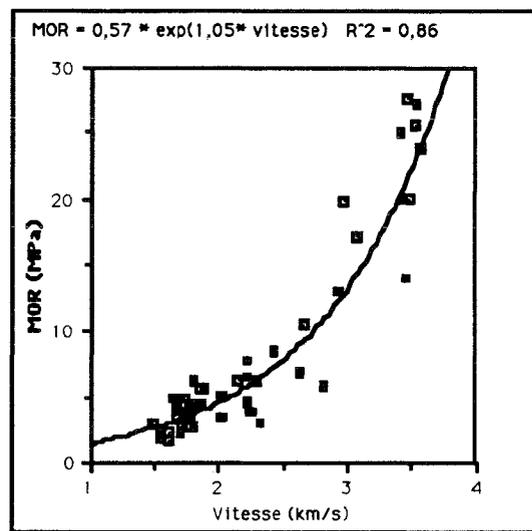


Figure 41- Corrélation entre la vitesse de propagation et la résistance à l'écrasement pour les éprouvettes cylindriques âgées de plus de 28 jours

Les courbes des figures précédentes confirment le rôle singulier du saccharose. Dans le cas du fructose et du glucose, la résistance mécanique diminue en fonction de la concentration et tend vers une valeur limite. Pour le saccharose, l'effet inhibiteur apparaît déjà pour de très faibles concentrations, il augmente très légèrement avec la concentration puis diminue pour tendre ensuite vers une valeur limite. De plus, si on se limite aux concentrations élevées, le fructose et le saccharose ont des pouvoirs inhibiteurs voisins mais le glucose semble plus inhibiteur que les deux autres. Nous avons retrouvé cette influence du glucose lors de l'étude des mélanges binaires des sucres.

En résumé, lors du lavage de la biomasse végétale l'élimination des sucres tels que le saccharose, le fructose et le glucose est un paramètre essentiel pour réduire l'effet inhibiteur de la biomasse végétale. Toutefois, cet effet inhibiteur peut être réduit même si la solution de lavage ne contient pas les sucres précédents car d'autres produits peuvent être inhibiteurs (cas des tannins par exemple). Nous avons vérifié que le hêtre (noté **H**) et le pin maritime (noté **M**) non lavés inhibent la prise du ciment (tableau XVI). Une fois lavé, leur prise est voisine de celle du sapin alors que les eaux de lavage contiennent des quantités très faibles des trois sucres (pour le hêtre, les concentrations de saccharose, fructose et de glucose sont respectivement de 0,053, 0,063 et 0,048 g/l et pour le pin maritime les eaux de lavage ne contiennent aucun des trois sucres). On constate une augmentation de la variation de la température maximale d'hydratation (ΔT_{max}), lors des mélanges du ciment avec du bois lavé.

En définitive, de nombreuses espèces végétales contiennent des produits solubles inhibiteurs de la prise du ciment et un lavage à l'eau à la température ambiante sera suffisant pour conduire à un composite biomasse végétale-ciment dont les variations dimensionnelles sont plus faibles que celles de la biomasse non lavée. Toutefois, le temps de prise (en h) du composite (noté **TP**) reste en général supérieur à celui du ciment pur ($t = 8$ h). Il est probable que la biomasse lavée conserve encore des propriétés inhibitrices vis à vis du ciment.

Ep	Type	TP	ΔT_{max}	B	C	E	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C03	Bambou	15	7,5	469	364	208	0,4	16,8	12,5	9,7
C04	Bambou	7	7,5	344	364	323	0,2	14,0	10,4	6,1
H02	Hêtre	6	10,0	284	406	355	1,2	14,2	14,3	11,6
H03	Hêtre	7	12,5	281	401	351	1,4	16,6	14,9	12,0
M01	Pin marit	3	6,5	257	400	343	1,4	6,8	8,7	6,0
M02	Pin marit	5	6,0	260	406	363	1,4	8,1	9,5	6,8
C32	80°C-2 h	11	15,0	312	521	338	5,1	7,1	5,2	2,7
H06	80°C-2 h	11	16,0	275	393	328	1,6	8,2	9,5	7,2
H07	80°C-2 h	11	16,0	274	391	326	1,5	7,4	9,0	6,7
M05	80°C-2 h	12	14,0	233	363	311	2,3	5,6	6,6	4,4
M06	80°C-2 h	15	11,0	242	377	390	3,1	5,2	5,4	4,0

Tableau XVI- Influence du lavage à l'eau sur les essences inhibitrices étudiées

IV.3 OPTIMISATION ET GENERALISATION DU PROTOCOLE DE STABILISATION DES CBC PROPOSE PAR E. MOUGEL

La recherche développée par E. MOUGEL sur des particules de sapin des Vosges a montré que les composites bois-ciment pouvaient présenter des variations dimensionnelles, mesurées dans les conditions de la norme française (inférieures à 1 mm/m), à condition de préparer le composite selon un protocole comportant en plus de l'étape de lavage décrite précédemment deux autres étapes, à savoir:

- un traitement de l'interface du bois par imprégnation ou par pulvérisation afin de réduire les échanges d'eau entre les particules de biomasse végétale et la matrice ciment
- un renforcement de la matrice ciment par addition de sable ou de certains additifs permettant d'accroître la résistance à l'écrasement des composites.

Dans ce qui suit, nous avons tout d'abord cherché à optimiser ces deux étapes par la mise en oeuvre de nouveaux produits, puis nous avons vérifié que cette méthodologie s'applique avec succès sur les quatre espèces végétales étudiées.

IV.3.1 OPTIMISATION DE L'ETAPE DE TRAITEMENT DE L'INTERFACE DES PARTICULES DE BIOMASSE

Cette optimisation a été effectuée essentiellement sur deux essences une non inhibitrice (sapin) et l'autre inhibitrice (bambou *Phyllostachys viridis*).

Les traitements de l'interface de la biomasse végétale dépendent de la structure anatomique de chaque espèce et pour certaines espèces comme le bambou de la région dans lesquelles sont découpées les particules. Ainsi pour le *D. giganteus* le diamètre des vaisseaux peut varier de 100 μm (région externe de la paroi) à 200 μm (région interne de la paroi). Pour le bambou *P. viridis*, le diamètre varie de 40 à 120 μm . De même, le pourcentage de vaisseaux dans la paroi du chaume de bambou varie entre la région interne et la région externe. Les mêmes considérations, dans une

moindre mesure, doivent être considérées dans le cas des essences de bois étudiées. Les trachéides du sapin ont un diamètre moyen compris entre 25 et 65 μm et celles du pin maritime ont une valeur moyenne de 40 μm . Pour le hêtre, la taille des vaisseaux est comprise entre 55 et 70 μm . En dehors de la dimension des éléments anatomiques, il faut également tenir compte de la profondeur de pénétration des produits. Ainsi, dans le cas du pin maritime, la présence de cellules de grand diamètre n'implique pas forcément une bonne pénétration du produit, car les éléments anatomiques peuvent être remplis de résine. Enfin, les particules étant obtenues par déchiquetage, la formation de fissures sur les particules peut faciliter la pénétration du produit.

En définitive, l'efficacité du traitement dépend probablement de la structure anatomique, mais la quantité optimale de produit à déposer ne peut, compte tenu de l'hétérogénéité anatomique des particules, être obtenue qu'expérimentalement en augmentant progressivement la masse déposée. Tous les traitements de l'interface décrits ci-après ont été réalisés par pulvérisation d'une solution, d'une émulsion ou d'une suspension du produit.

IV.3.1.1 TRAITEMENT PAR UNE SUSPENSION DE CIMENT

Les particules de bambou préalablement lavées à l'eau chaude sont pulvérisées par des suspensions de ciment contenant 100 à 400 g de ciment par demi-litre d'eau. On a fait varier la masse de ciment déposée et, dans certains cas, le dépôt a été effectué à plusieurs reprises chacune des pulvérisations étant suivie d'une période de séchage avant une nouvelle pulvérisation. L'ensemble des caractéristiques des éprouvettes confectionnées avec les particules traitées avec du ciment est résumé dans le tableau XVII.

Ep	Traitement	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C86	aucun	317	462	330	880	5,0	7,2	5,5	4,3
C56	100/500	363	457	260	880	5,6	6,3	5,1	3,3
C69	100/500	321	471	321	960	5,6	5,6	4,4	3,7
C70	200/500	397	436	298	950	5,7	5,7	4,4	3,5
C71	300/500	447	437	298	1000	10,2	4,8	3,5	2,6
C72	400/500	495	436	297	1050	12,5	4,8	3,5	2,6
C74	3x(100/500)	316	463	316	1090	12,5	4,7	3,2	2,5
C88	2x(100/250)	309	454	309	950	4,7	6,2	4,6	3,8
C101	200/500	274	397	308	770	3,5	7,2	5,5	4,3
235	aucun	220	438	400	770	3,8	5,3	4,6	3,3
240	100/500	279	520	394	710	2,3	5,0	3,8	3,6
250	200/500	274	452	355	840	4,5	5,4	4,7	3,2
262	400/500	213	426	355	900	7,0	5,2	3,6	3,8
270	2x(70/500)	234	441	401	870	4,6	6,6	5,2	4,0

Tableau XVI- Influence de la pulvérisation des particules par une suspension de ciment

L'analyse du tableau XVI montre que la pulvérisation des particules par suspension de ciment favorise, dans tous les cas, l'accroissement de la résistance à l'écrasement. Il est fort probable que la couche de ciment sur les particules améliore la prise du ciment dans la matrice. De plus, même si l'hydratation du ciment déposée est incomplète, les particules de ciment hydratées peuvent jouer le rôle de "filler" dans la nouvelle matrice. En augmentant la masse volumique par ajout de ciment, on constate une réduction des variations dimensionnelles. L'effet est plutôt dû à l'accroissement global du rapport massique ciment sur biomasse qu'au traitement particulier de la biomasse par une pulvérisation du ciment. Lorsque les masses déposées sont faibles, on observe plutôt un léger accroissement des variations dimensionnelles.

IV.3.1.2 TRAITEMENT PAR DES POLYMERES DERIVES D'AMIDON

Un fournisseur industriel nous a orienté vers des produits qui limitent, selon ses dires, les variations dimensionnelles du bois traité par ces produits. Trois types de produits ont été examinés et les rapports massiques déposés ont représenté 5, 10 et 20% de la masse de bois. Les

essais sont effectués sur les particules de sapin et les résultats obtenus sur les éprouvettes sont consignés dans le tableau XVII.

Ep	Type	B	C	E	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
235	CBC-Sapin-Référence	220	438	400	3,8	5,3	4,6	3,3
234	POLYSORB (5%)	220	438	400	0,4	3,9	11,3	6,0
232	POLYSORB (10%)	220	438	400	0,6	7,0	12,1	9,0
233	POLYSORB (20%)	244	487	444	0,9	7,2	11,0	8,9
237	TACKIDEX 050 (5%)	259	516	471	0,3	7,1	10,8	7,1
239	TACKIDEX 050(10%)	292	477	312	0,6	6,8	6,1	4,2
238	TACKIDEX 050 (20%)	220	438	400	0,2	-	-	-
244	TACKIDEX G160 (5%)	240	438	367	0,3	6,9	14,4	10,9
245	TACKIDEX G160 (10%)	250	438	333	0,3	3,3	12,1	11,2
246	TACKIDEX G160 (20%)	341	518	392	0,2	7,6	-	-

Tableau XVII - Influence de la pulvérisation de polymères à base d'amidon

Ils sont totalement négatifs et ils rappellent ceux observés avec le bambou non traité. Le bambou étant un végétal riche en amidon, l'effet des produits dérivés d'amidon confirme le caractère très inhibiteur de l'amidon et de ses dérivés sur la prise du ciment. Il est donc indispensable de choisir un produit de traitement compatible avec la prise du ciment.

IV.3.1.3 TRAITEMENT PAR PULVERISATION DE LIQUIDES ORGANIQUES A CHAINE LONGUE

Nous avons examiné l'influence d'un dépôt d'huile de lin, d'huile de moteur usagée et de polyéthylèneglycol 400 (PEG). Dans ce dernier cas, la pulvérisation a été réalisée avec du produit pur ou dilué à l'eau à 50%. Pour toutes les pulvérisations, la fraction massique de produit déposée est fixée à 20%. Les caractéristiques des éprouvettes réalisées avec les particules traitées sont données dans le tableau XVIII.

Ep	Traitement	B	C	E	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
235	CBC-Sapin-Référence	220	438	400	3,8	5,3	4,6	3,3
157	Huile de lin (20%)	237	438	350	2,1	2,3	4,2	2,5
165	Huile de vidange (20%)	267	438	350	2,0	3,0	3,5	2,2
171	PEG 400 (20%)	267	438	383	1,9	1,5	3,7	1,7
229	PEG 400 (20%)-dilué 50%	243	438	367	4,2	3,0	2,6	2,3
230	PEG 400 (20%)-non dilué	243	438	367	4,2	1,7	2,7	1,4

Tableau XVIII- Influence de la pulvérisation de liquides organiques à chaîne longue

Dans tous les cas, on observe une amélioration sensible des variations dimensionnelles. Le PEG est le plus efficace et c'est le seul qui permet un accroissement de la résistance mécanique à l'écrasement. Ceci est dû au fait qu'étant soluble dans l'eau, il permet l'accrochage du ciment sur les particules de bois. Pour les deux autres produits hydrophobes, leur caractère lubrifiant favorise probablement la non adhérence bois-ciment et le glissement des particules. Le PEG dilué conduit, dans notre cas, à des variations dimensionnelles légèrement supérieures à celles obtenues avec les particules traitées avec du PEG pur. Ce résultat est opposé à celui observé par MOUGEL (1992). On peut, à cette occasion, insister sur les difficultés liées à nos mesures de variations dimensionnelles:

- l'incertitude sur la valeur indiquée est loin d'être négligeable puisque nous devons mesurer des variations de longueur inférieures à quelques centaines de microns sur une longueur de 0,1 m. De plus, la mesure est visuelle.
- les valeurs indiquées correspondent à des moyennes de 4 mesures (2 par échantillon), les écarts observés entre les deux échantillons ne sont pas toujours négligeables.
- les mesures de variations sont telles qu'en général $Cy0 > Cy1 > Cy2$. Lorsqu'on observe une évolution différente, elle peut être due à une mauvaise lecture ou à la dégradation de l'éprouvette.

En définitive, la pulvérisation du PEG 400 sur les particules de sapin permet d'accroître les caractéristiques mécaniques à l'écrasement et de réduire sensiblement les variations dimensionnelles des composites. La fraction massique déposée est loin d'être excessive, mais le PEG 400 reste un produit dont le coût est trop élevé. Nous nous sommes orientés vers des produits organiques de coût plus faible, à savoir les bitumes, qui sont compatibles avec le ciment. En effet, ces produits sont couramment utilisés dans le bâtiment comme produits hydrofuges.

IV.3.1.4 TRAITEMENT PAR PULVERISATION DE BITUME

Les bitumes fournis par la division "lubrifiants" de la société ESSO se présentent sous forme d'émulsion aqueuse (B1 et B2) ou en solution organique (B3). Les fractions massiques de bitume sont respectivement de 65%, 50% et 60%. Avec notre dispositif de pulvérisation, les émulsions sont délicates à mettre en oeuvre (bouchage de la buse) et ont une répartition peu homogène. La solution B3 est plus adaptée à notre dispositif, mais l'utilisation d'un solvant (kérosène) nécessiterait en cas d'industrialisation l'élimination ou le recyclage du solvant.

Les caractéristiques des éprouvettes réalisées avec les particules imprégnées de bitume sont données dans le tableau XIX.

Ep	Bitume	%	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
235	aucun	0	220	438	400	770	3,8	5,3	4,6	3,3
247	B1 (65%)	5	238	431	392	780	3,7	5,3	4,9	3,8
248	B1 (65%)	10	278	437	397	790	3,1	3,2	3,8	2,9
284	B1 (65%)	10	255	443	403	800	3,7	2,2	3,0	2,1
249	B1 (65%)	20	280	440	367	820	2,5	3,7	3,0	2,7
266	B2 (50%)	5	228	440	400	790	2,9	3,5	3,3	2,9
264	B2 (50%)	10	270	489	444	900	3,4	4,6	3,7	2,4
281	B2 (50%)	10	247	429	390	770	3,1	3,0	3,3	2,2
279	B2 (50%)	20	231	436	396	840	2,7	4,3	2,7	2,3
282	B2(50%)	20	272	433	393	820	3,5	3,1	2,9	2,1
287	B3 (60%)	10	270	452	411	840	4,0	2,2	2,9	2,3
288	B3 (60%)	20	298	433	393	840	3,8	2,4	2,3	2,1

Tableau XIX- Influence de la pulvérisation d'émulsion et de solution de bitume

Quelque soit le type de bitume utilisé, lorsqu'on accroît la masse pulvérisée, on observe une diminution des caractéristiques à l'écrasement et une tendance à l'agglomération des particules traitées pour des rapports massiques supérieurs à 20%. La fraction massique optimale semble être de 10% et, dans ces conditions, la variation dimensionnelle des éprouvettes est légèrement supérieure à 2 mm/m. Notons que le bitume est moins performant que le PEG 400 mais les différences de coût sont si importantes que dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le bitume pulvérisé.

IV.3.2 OPTIMISATION DE L'ETAPE DE TRAITEMENT DE LA MATRICE CIMENT

Le traitement de l'interface des particules ne permettant pas d'atteindre l'objectif visé, à savoir, des variations dimensionnelles inférieures à 1 mm/m, nous avons donc, suite aux observations de MOUGEL (1992), cherché à accroître les caractéristiques mécaniques des composites par ajout d'additifs du type accélérateurs, de sable ou de composés minéraux (calcaire) de granulométrie adaptée.

IV.3.2.1 AJOUT D'ACCELERATEURS

De nombreux auteurs ont affirmé que le lavage des particules de bois ou l'ajout de chlorure de calcium permet de minimiser les effets néfastes des substances inhibitrices du ciment. Pour les trois espèces inhibitrices du ciment que nous avons étudiées, nous avons cherché à vérifier l'effet cumulé de ces deux traitements sur les propriétés mécaniques et dimensionnelles des composites. Les résultats obtenus sur les éprouvettes sont donnés dans le tableau XX.

Ep	Traitement	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C86	lavage	317	462	330	880	5,0	7,2	6,1	4,8
C106	lavage+CaCl ₂	275	367	306	750	3,8	7,6	7,7	5,2
M01	aucun	257	400	343	710	1,4	6,8	8,7	6,0
M03	CaCl ₂	250	390	333	730	3,0	10,8	8,0	5,2
M07	lavage+CaCl ₂	241	376	386	730	3,6	7,2	5,8	4,3
H01	aucun	280	392	350	730	1,5	15,3	16,1	12,8
H05	CaCl ₂	275	392	343	770	2,8	11,6	9,8	7,6
H08	lavage+CaCl ₂	274	430	394	830	3,2	7,7	7,0	4,6

Tableau XX- Influence de l'ajout de CaCl₂ (3%)

Les particules de bambou, de pin maritime et de hêtre, sont lavées à l'eau à 80°C durant 2 h, la fraction massique de chlorure de calcium ajoutée au ciment est de 3%.

Le lavage des particules joue un rôle sensible sur les caractéristiques mécaniques et les variations dimensionnelles du bambou et du pin maritime. En revanche, le chlorure de calcium est sans effet sur ces deux paramètres. Pour le hêtre, le lavage n'étant pas suffisant, l'ajout de chlorure de calcium joue un rôle notable sur ces deux aspects. On pourra donc songer dans le cas où l'opération de lavage s'avérerait peu efficace pour limiter les propriétés inhibitrices du matériau vis à vis du ciment. Dans les autres cas, le chlorure de calcium ne semble pas efficace.

IV.3.2.2 AJOUT DE COMPOSES MINERAUX

Pour accroître la résistance mécanique de la matrice, on a ajouté au ciment différents agrégats. Les agrégats siliceux ont été fournis par la société SIFRACO. Ils se différencient par leur dimension moyenne. Le C400 correspond à un D_{50}^* de 10 μm alors que le LA35 a un D_{50} de 175 μm . D_{50} représente le diamètre médian en masse. La surface spécifique du C400 est 30 fois plus grande que celle du LA35. Par rapport aux particules de ciment (CPA55) dont le diamètre médian est de 15 μm les dimensions de deux agrégats siliceux encadrent celles des particules de ciment. Pour les éprouvettes, nous avons maintenu la même masse de biomasse et de ciment et nous avons fait varier le rapport massique du sable par rapport au ciment. Les valeurs choisies sont 1/3, 2/3, 3/3 et 3/2. La masse d'eau est adaptée afin que le mélange conserve une consistance voisine compatible à la fabrication des éprouvettes. En plus des agrégats siliceux, nous avons réalisé une éprouvette où le sable est remplacé par un calcaire naturel d'une carrière mosellane.

L'ensemble des caractéristiques des éprouvettes ainsi conçues est résumé dans le tableau XXI.

* 50% de grains supérieurs à 10 μm

Ep	Ajout	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
235	aucun	220	438	400	770	3,8	5,3	4,6	3,3
254	C400 (1/3)	209	418	411	890	4,0	5,3	4,1	3,0
255	C400 (2/3)	194	389	383	960	4,2	3,5	2,5	2,1
261	C400 (3/3)	220	440	467	1220	>5,0	2,8	1,6	1,2
256	LA35 (1/3)	212	424	418	890	3,7	4,5	3,4	3,2
258	LA35 (2/3)	209	419	429	1040	>5,0	2,1	1,9	1,8
257	LA35 (3/3)	203	406	431	1140	>5,0	2,9	1,6	1,8
263	LA35 (3/2)	206	349	436	1080	>5,0	2,6	2,2	1,6
260	Calcaire (2/3)	205	410	419	1000	4,4	3,8	3,1	2,3

Tableau XXI- Influence de l'ajout d'agrégats dans la matrice ciment

En additionnant à la matrice des particules siliceuses, on augmente la masse volumique, la résistance à l'écrasement et on diminue les variations dimensionnelles. Pour les caractéristiques mécaniques la granulométrie du sable n'a pas trop d'importance. En revanche, le sable C400 de diamètre médian inférieur à celui du ciment semble favoriser une amélioration de la stabilité dimensionnelle. En augmentant la proportion de sable vis à vis du ciment, on ne modifie pas sensiblement les caractéristiques du composite. Il sera donc possible de réduire la proportion de ciment dans le composite. Ceci a été confirmé sur des éprouvettes avec des particules de bambou (tableau XXII).

Ep	Ajout	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
C90	LA35(3/3)	263	368	315	1110	7,3	2,6	2,2	1,8
C91	LA35(3/3)	271	378	309	1140	6,6	2,7	2,1	1,5
C92	LA35(3/2)	265	295	302	1090	6,1	2,6	2,3	1,8

Tableau XXII- Influence de l'ajout de LA35 dans la matrice (cas des particules de bambou)

Enfin l'utilisation de calcaire à la place du sable ne semble pas bénéfique. Toutefois, si ce matériau est disponible localement il n'est pas exclu d'y faire appel pour remplacer le sable. De plus n'ayant pas réalisé une étude systématique avec ce matériau (granulométrie, proportion, etc.), il nous est difficile de l'écarter à priori.

En additionnant à la matrice des agrégats siliceux, on réduit les variations dimensionnelles des composites mais celles ci restent encore supérieures à 1 mm/m, alors que les masses volumiques des composites

dépassent 1200 kg/m³. Or, l'objectif visé concerne non seulement les variations dimensionnelles mais aussi la masse volumique qui doit rester si possible inférieure à 1100 kg/m³. Il nous faut donc faire appel aux traitements mixtes associant le traitement de l'interface des particules et l'ajout de granulats siliceux.

IV.3.3 TRAITEMENTS MIXTES- APPLICATION DE LA METHODOLOGIE AUX QUATRE ESPECES VEGETALES ETUDIEES

IV.3.3.1 MISE AU POINT DU TRAITEMENT MIXTE OPTIMAL

Compte tenu des résultats présentés dans le paragraphe IV.3.1.4, le traitement de l'interface retenu est la pulvérisation par du bitume. En ce qui concerne la fraction massique de sable à ajouter à la matrice, nous avons cherché à la déterminer en l'augmentant progressivement. Les études ont été conduites sur les particules de sapin et les particules de bambou lavées. Les caractéristiques des éprouvettes ayant subi un traitement mixte sont résumées dans le tableau XXIII.

Ep	Ajout	Produit	%	B	C	E	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy 2
235	aucun	-	0	220	438	400	770	3,8	5,3	4,6	3,3
265	LA35 (2/3)	B2(50%)	10	245	443	436	1120	4,9	2,2	1,6	1,3
271	C400 (2/3)	B2(50%)	10	240	423	449	1080	7,8	3,1	1,6	1,5
273	LA35 (3/3)	B2(50%)	10	226	398	421	1130	6,1	2,1	1,4	1,1
274	C400 (3/3)	B2(50%)	10	216	380	403	1100	5,6	2,3	1,9	1,1
283	C400 (3/3)	B2(50%)	10	206	358	380	1040	5,0	2,1	1,8	1,2
286	C400 (3/3)	B1(65%)	10	215	364	386	1050	5,6	1,8	1,4	0,9
285	C400 (3/3)	B1(65%)	20	244	362	384	1080	6,2	0,9	1,3	1,0
289	C400(3/3)	B3(60%)	10	230	384	407	1130	7,1	1,1	1,0	0,9
C86	aucun	-	0	317	462	330	890	5,0	7,2	6,1	4,8
C85	LA35(1/3)	B2(50%)	10	307	422	288	1020	3,5	5,0	3,6	1,9
C95	C400(3/3)	B2(50%)	10	294	372	405	1170	8,2	2,9	1,6	1,3
C97	C400(3/3)	B2(50%)	20	322	372	372	1190	8,2	2,8	1,4	0,9
C98	C400(3/3)	B2(50%)	10	309	378	378	1200	7,6	2,6	1,3	0,8
C99	C400(3/2)	B2(50%)	10	303	296	337	1140	7,0	2,6	1,7	1,4
C105	C400 (3/3)	B3(60%)	10	300	367	367	1130	4,8	2,2	1,0	1,2

Tableau XXIII - Influence des traitements mixtes sur les caractéristiques des éprouvettes

Pour atteindre l'objectif visé, il s'avère indispensable d'ajouter à la matrice de ciment une masse d'agrégat siliceux égale à celle du ciment. De plus, le choix du C400 semble préférable à celui du LA35 dont la granulométrie est supérieure à celle des particules de ciment.

Le conditionnement du bitume dépend évidemment de la méthode de pulvérisation utilisée (voir chapitre III.3.3). Nous avons donné une préférence à la solution du bitume diluée dans du kérosène (B3), car c'est la forme la plus facile à pulvériser à l'aide d'un pistolet à air comprimé.

IV.3.4 EXTENSION DU TRAITEMENT AUX AUTRES ESPECES VEGETALES ETUDIEES

Les particules lavées et séchées sont soumises à une pulvérisation de bitume B3 avec une fraction massique en bitume de 10%. Lors de la préparation des éprouvettes, on ajoute une masse de silice C400 égale à celle du ciment. Les caractéristiques des éprouvettes ainsi réalisées pour les 4 espèces végétales étudiées sont représentées dans le tableau XXIV. Dans ce tableau, nous avons également rappelé les caractéristiques des éprouvettes qui n'ont pas subi un traitement du renforcement de la matrice.

Ep	Ajout	Produit	%	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
235	aucun	aucun	0	220	438	400	770	3,8	5,3	4,6	3,3
288	aucun	B3(60%)	10	298	433	393	850	3,8	2,4	2,3	2,1
289	C400 (3/3)	B3(60%)	10	230	384	407	1130	7,1	1,1	1,0	0,9
C86	aucun	aucun	0	317	462	330	890	5,0	7,2	6,1	4,8
C104	aucun	B3(60%)	10	347	382	382	810	2,2	4,1	2,4	2,6
C105	C400 (3/3)	B3(60%)	10	300	367	367	1130	4,8	2,2	1,0	1,2
H06	aucun	aucun	0	275	393	328	750	1,6	8,2	9,5	7,2
H09	aucun	B3(60%)	10	315	406	372	800	1,6	5,3	3,6	2,5
H10	C400 (3/3)	B3(60%)	10	299	399	365	1215	5,1	2,1	0,9	0,8
M06	aucun	aucun	0	242	377	390	710	3,0	5,2	5,4	4,0
M09	aucun	B3(60%)	10	290	410	375	785	2,0	3,3	3,0	2,5
M10	C400 (3/3)	B3(60%)	10	262	393	393	1160	4,9	1,9	1,0	0,8

Tableau XXIV - Comparaison entre les espèces étudiées: Sapin; C=Bambou H=Hêtre
M= Pin maritime

Le traitement mixte optimal répond à l'objectif visé pour l'ensemble des espèces végétales étudiées. On peut aussi noter que l'influence de

l'imprégnation est d'autant plus importante que les particules sont inhibitrices ou que les dimensions des vaisseaux et des cellules sont grandes. On confirme ainsi le rôle négatif des échanges d'eau lors de la préparation des composites à base de mélanges biomasse végétale-ciment.

A ce stade, deux remarques doivent être faites sur la validité des valeurs absolues des variations dimensionnelles des composites.

Pour chacune des éprouvettes, les dimensions sont mesurées horizontalement (x) et dans la direction verticale du tassement (y). A titre d'exemple, nous donnons dans le tableau XXV les dimensions mesurées sur l'éprouvette **V** des essais **235** et **289** réalisées avec les particules de sapin à l'issue des différents cycles de gonflement et de retrait. Rappelons que l'essai **235** correspond à l'éprouvette réalisée avec les particules de sapin brute alors que l'essai **289** correspond à l'éprouvette relative au traitement mixte optimal.

Dimensions (mm)	289V _x	289V _y	235V _x	235V _y
Initiales	105,60	111,54	105,86	102,46
Gonflement 1	105,64	111,62	105,89	102,55
Retrait 1	105,60	111,52	105,46	101,98
Gonflement 2	105,68	111,63	105,79	102,52
Retrait 2	105,64	111,54	105,48	102,12
Gonflement 3	105,70	111,66	105,79	102,54
$\Delta G1$ (mm/m)	0,4	0,7	0,3	0,9
$\Delta R1$ (mm/m)	0,0	0,2	3,8	4,7
$\Delta G2$ (mm/m)	0,8	0,8	-0,7	0,6
$\Delta R2$ (mm/m)	-0,4	0,0	3,6	3,3
$\Delta G3$ (mm/m)	0,9	1,1	-0,7	0,8

Tableau XXV - Variations dimensionnelles des éprouvettes **V** des essais **235** et **289**

Les variations dimensionnelles selon les directions horizontale et verticale sont différentes. Généralement, elles sont plus importantes dans la direction verticale. Ceci est du probablement au mode de fabrication des éprouvettes. Les parois latérales du moule constituent une barrière lors du tassement et la composition du composite dans la direction horizontale est plus homogène. En revanche, dans la direction verticale entre la surface libre et le fond, on crée une hétérogénéité de tassement et de la répartition

de l'eau. En ce qui concerne les erreurs de mesure des dimensions réalisées avec un palmer entre les plots fixés sur le composite, on peut les estimer à 0,02 mm, ce qui conduit à une erreur absolue de 0,4 mm/m sur les variations dimensionnelles totales. Pour les meilleures éprouvettes, cette erreur est loin d'être négligeable et pour améliorer la précision, il est indispensable d'effectuer ces mesures sur des éprouvettes de plus grandes dimensions (les essais normalisés sont en général effectués sur des éprouvettes de section 100 x 100 mm et de 400 mm de longueur).

Ainsi pour valider notre protocole de fabrication nous avons réalisé 21 éprouvettes de dimensions 100 x 100 x 400 mm. 1,5% de chlorure de magnésium par rapport à la masse de ciment a été ajouté dans 6 des 21 éprouvettes. Les variations dimensionnelles de 8 éprouvettes à l'issue des différents cycles de gonflement et de retrait sont données en annexe III.11. Ces variations sont inférieures à 1 mm/m et ceci dès le premier cycle. De plus, l'adjonction de chlorure de magnésium ne semble apporter aucune amélioration sur les variations dimensionnelles. Nous pouvons donc affirmer que le protocole validé sur les petites éprouvettes est confirmé sur les grandes dans la direction longitudinale.

IV.3.5 CONCLUSION

Cet ensemble expérimental semble satisfaisant puisque le protocole décrit (voir conclusion générale) permet d'aboutir à un composite dont les variations dimensionnelles contrôlées sont inférieures à 1 mm/m. Toutefois, l'analyse des données montre que ce résultat n'est atteint généralement qu'à la fin du 2^{ème} cycle, c'est à dire après un temps, dans tous les cas, supérieur aux 28 jours préconisés par la norme relative aux bétons légers.

Nous avons donc cherché à réduire cette durée; c'est l'objectif du dernier chapitre de notre recherche.

CHAPITRE V

<p>OPTIMISATION DE LA DUREE DE STABILISATION DES EPROUVETTES</p>

V.1 INTRODUCTION

Lorsque l'on prépare les éprouvettes avec le protocole optimal, avant d'effectuer les mesures des variations dimensionnelles, on laisse les éprouvettes démoulées à l'air libre. Pour réduire le temps des essais MOUGEL (1992) avait choisi une exposition à l'air libre de 7 jours. Pour les essais normalisés la durée prévue est de 28 jours. Dans le tableau XXVI nous suivons l'évolution des caractéristiques des éprouvettes en fonction du temps d'exposition à l'air.

Ep	Cure	B	C	E	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
290	7A	228	396	396	1140	5,5	2,3	1,1	0,8
291	28A	225	392	392	1140	6,7	1,7	0,9	0,8
313	45A	201	365	395	1050	5,4	1,5	1,4	1,0

Tableau XXVI - Influence du temps d'exposition à l'air (A) sur les caractéristiques des éprouvettes

L'analyse du tableau précédent fait apparaître une évolution et confirme une observation constaté sur l'ensemble des éprouvettes. Une augmentation du temps de stabilisation permet de diminuer les variations dimensionnelles après le cycle zéro (Cy 0) et de réduire, en conséquence, les écarts observés entre les cycles 0, 1 et 2.

La diminution des variations dimensionnelles du cycle zéro correspond à un durcissement de la matrice qui est du, d'après la littérature, à la carbonatation de la chaux d'hydratation par le CO₂ de l'air.

Les écarts observés entre les cycles 0, 1 et 2 sont attribués généralement à une cicatrisation des microfissures produites lors de la prise du ciment.

Pour réduire la durée de stabilisation, nous avons cherché à accélérer les deux phénomènes précédents:

- la carbonatation de la chaux d'hydratation
- la recicatrisation de la matrice ciment

V.2 CARBONATATION DE LA CHAUX D'HYDRATATION

V.2.1 AJOUT DIRECT DE CALCAIRE DANS LA MATRICE CIMENT

L'action du CO₂ sur l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) conduit à la formation de carbonate de calcium (CaCO₃). Nous avons déjà vu, dans le chapitre précédent, que le remplacement du sable par du calcaire naturel n'apportait pas d'amélioration. Nous avons voulu vérifier si les résultats étaient différents lorsqu'on ajoute à la matrice du calcaire pur de granulométrie voisine de celle des particules de ciment. La granulométrie du premier lot est comprise entre 0 et 100 µm et celle du deuxième lot est comprise entre 0 et 300 µm. Les fractions massiques additionnées représentent respectivement 10 et 20% de la masse de ciment. Les caractéristiques des éprouvettes réalisées avec la procédure optimale et les particules de sapin sont représentées dans le tableau XXVII.

Ep	Ajout	B	C	E	MV	MOR	Cy 0	Cy 1	Cy 2
289	aucun	230	384	407	1130	7,0	1,1	1,0	0,9
290	aucun-ESSTIB	228	396	396	1140	5,5	2,3	1,3	0,8
275	Calcaire 0/100 (10%)	229	360	428	1170	5,3	1,5	1,4	1,2
277	Calcaire 0/100 (20%)	231	325	431	1150	5,3	2,1	1,3	1,1
276	Calcaire 0/300 (10%)	223	353	416	1110	5,4	0,4	1,3	1,2
278	Calcaire 0/300 (20%)	229	322	427	1130	4,7	1,6	1,4	1,1

Tableau XXVII - Influence de microparticules de calcaire pure

L'addition de calcaire n'a aucune incidence positive et aurait même tendance à diminuer les caractéristiques mécaniques et à accroître les variations dimensionnelles.

V.2.2 CARBONATATION DIRECTE DE LA CHAUX PAR ADDITION DE CARBONATE ET D'HYDROGENOCARBONATE DE SODIUM

La matrice ciment étant basique, la carbonatation de l'hydroxyde de calcium peut être envisagée par addition dans la matrice d'un carbonate ou d'un hydrogénocarbonate soluble. L'influence des ajouts de carbonate sur les composites bois-ciment a été étudiée par SIMATUPANG et coll. (1990). Parmi les carbonates envisagés (potassium, ammonium et sodium), le plus performant est celui de potassium mais nous l'avons écarté car son coût est élevé. Le carbonate d'ammonium conduit à des dégagements d'ammoniac et son emploi industriel nécessiterait un traitement des effluents gazeux. En définitive, notre choix s'est limité aux sels de sodium. Les résultats obtenus sur les éprouvettes fabriquées avec 2,5% de carbonate et d'hydrogénocarbonate de sodium sont donnés dans le tableau XXVIII. Les sels sont solubilisés initialement dans une partie de l'eau servant à la préparation du mélange.

Ep	Ajout	B	C	E	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
290	aucun	228	396	396	1140	5,5	2,3	1,1	0,8
309	Na ₂ CO ₃ (5%)	210	365	535	870	2,6	3,8	2,3	2,2
311	Na ₂ CO ₃ (5%)	198	359	419	1050	2,8	2,7	1,8	1,8
315	Na ₂ CO ₃ (2,5%)	207	376	439	1100	4,6	1,9	1,8	1,2
317	Na ₂ CO ₃ (2,5%)-dis	211	383	447	1100	4,9	2,1	1,3	0,8
310	NaHCO ₃ (5%)	218	378	555	960	2,5	2,8	1,7	1,5
312	NaHCO ₃ (5%)	205	373	435	1080	3,7	2,2	1,2	1,0
316	NaHCO ₃ (2,5%)	201	366	427	1080	4,2	2,6	1,7	0,9
318	NaHCO ₃ (2,5%)-dis	202	367	428	1050	4,2	2,8	1,6	1,1

Tableau XXVIII - Influence de l'ajout de carbonate et d'hydrogenocarbonate de sodium

L'ajout des sels ne conduit à aucune amélioration. En augmentant les fractions massiques de 2,5% à 5%, on observe plutôt une dégradation des caractéristiques mécaniques et une augmentation des variations dimensionnelles.

V.2.3 CARBONATATION DIRECTE DE LA CHAUX PAR ACTION DE L'ANHYDRIDE CARBONIQUE A L'ETAT GAZEUX

L'action du CO₂ gaz est, sur le plan réactionnel, identique à celle d'un carbonate. Toutefois, dans ce dernier cas, les réactions d'hydratation du ciment (formation de Ca(OH)₂) et de carbonatation de la chaux ont lieu simultanément. Avec CO₂, la réaction de carbonatation peut s'effectuer à l'issue de la réaction d'hydratation et la structure du produit de la réaction peut être différente, car la concentration dans l'eau des ions carbonate est trop faible. Ainsi, le carbonate formé doit être plus poreux en présence de CO₂ gaz.

La carbonatation des panneaux bois-ciment par du CO₂ gaz a été étudiée par DE SOUZA(1992) et SIMATUPANG (1993). Les panneaux de 16 mm d'épaisseur sont traversés par un courant gazeux de CO₂ sous des pressions de 7 à 15 bars. La carbonatation permet de réduire le temps de prise, d'éviter les lavages dans le cas de particules fortement inhibitrices et d'améliorer l'esthétique des panneaux (coloration plus uniforme).

Dans le cas de nos éprouvettes, il nous a fallu tout d'abord mettre au point un protocole expérimental, et ceci a été effectué sur des éprouvettes cylindriques de 53 mm de diamètre et de 110 mm de longueur. Les carbonatations sont effectuées en système fermé sur des éprouvettes après un temps **TM**. Avant d'être traitées, les éprouvettes sont soumises à un léger vide durant un temps **TV**. En effet, il est nécessaire que le gaz puisse diffuser dans tout le volume de l'échantillon et la bibliographie signale l'existence d'une humidité optimale de l'échantillon avant la réaction de carbonatation. Après élimination d'une partie de l'eau capillaire, l'éprouvette est soumise à une pression **P** de CO₂ gaz durant un temps de traitement **TT**. Les durées **TM**, **TV** et **TT** ont une influence directe sur les caractéristiques des éprouvettes:

- si l'éprouvette est démoulée dès sa fabrication puis carbonatée, on observe la présence de fissures et quelquefois une désagrégation de l'éprouvette. Il est donc nécessaire de démouler l'éprouvette après un temps optimal que nous avons cherché à définir en faisant varier **TM** de 1 h à 24 h.

Le vide réalisé ne doit pas être poussé et sa durée doit être choisie afin d'éliminer partiellement l'eau capillaire. Elle dépend de la taille de

l'échantillon, dans le cas des éprouvettes cubiques nous l'avons fixée à 30 minutes.

La réaction de carbonatation est très rapide. Dans le cas des éprouvettes cylindriques la durée de 1 h est suffisante. En effet, nous avons vérifié que la température maximale de l'échantillon était atteinte après une heure. Dans le cas des échantillons cubiques nous avons fait varier la durée de traitement de 1 h à 8 h, car sur les petites éprouvettes, nous avons constaté que la carbonatation se produit essentiellement sur les couches externes, la matrice ciment dans le noyau central de l'éprouvette restant non durcie après 1 heure de traitement. La diffusion du CO₂ gaz n'est donc pas suffisante et pour la favoriser, nous avons choisi d'ajouter à la matrice du sable LA35 de plus grand diamètre que le sable C400. En effet, avec le sable C400, le composite a une porosité plus faible et la masse d'eau ajoutée pour mouiller les particules est plus importante. Pour les éprouvettes cylindriques la résistance à l'écrasement après une heure de traitement est peu améliorée avec du sable C400 alors que celle de l'éprouvette fabriquée avec du sable LA35 est multipliée par 10 en comparaison d'une éprouvette similaire non carbonatée. Enfin, dans le cas des éprouvettes cylindriques, nous avons constaté qu'après carbonatation, le stockage des éprouvettes dans l'eau était préférable à un stockage à l'air libre. Ce résultat est identique aux constatations de YOUNG et coll. (1974). L'immersion dans l'eau des éprouvettes carbonatées permet de poursuivre les réactions d'hydratation du ciment (LEE et HSE, 1993).

En définitive, la carbonatation des éprouvettes dépend de nombreux paramètres. Notre objectif étant uniquement de voir si on peut réduire sensiblement le temps de stabilisation dimensionnelle, nous avons limité l'étude à 9 essais. Les caractéristiques des éprouvettes cubiques carbonatées sont résumées dans le tableau XXIX.

Ep	TM	TT	Stockage	B	C	E	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
324	1h	1h	air	219	399	299	1120	4,7	0,1	1,0	0,8
325	1h	8h	air	217	395	296	1110	5,0	2,2	1,4	0,9
323	4h	3h	air	208	378	347	1050	3,8	2,0	1,6	1,2
322	4h	3h	eau	211	383	351	1080	4,0	1,4	1,0	1,0
326	1j	1h	eau	217	395	296	1140	4,3	1,6	0,6	0,6
321	1j	3h	eau	203	369	400	1020	3,3	1,0	0,9	0,9
327	1j	8h	eau	221	403	302	1140	5,4	1,7	0,9	0,8
329	2j	1h	eau	219	399	299	1120	6,0	1,7	1,0	0,8
331	1h+9j	8h	eau	223	405	304	1140	4,7	1,9	1,3	0,9

Tableau XXIX- Influence de la carbonatation des éprouvettes humides par le CO₂

L'analyse du tableau précédent montre qu'après carbonatation, le stockage des éprouvettes dans l'eau est indispensable pour permettre la poursuite de l'hydratation du ciment. Pour les autres éprouvettes, on constate que la carbonatation permet d'atteindre l'objectif visé dès le premier cycle. Malheureusement, pour le cycle zéro les variations dimensionnelles restent supérieures à 1 mm/m. Des essais de carbonatation sur des éprouvettes à base de particules de bambou, de hêtre et de pin maritime ont conduit à des résultats similaires. L'effet le plus intéressant en carbonatation est probablement la possibilité de faire subir à l'échantillon âgé d'un jour, des traitements mécaniques ou physico-chimiques nécessitant une certaine tenue de l'éprouvette. En effet, après carbonatation les résistances à l'écrasement sont égales à 30% des résistances à l'écrasement des échantillons après 7 jours de stockage à l'air libre.

V.3 REICATRISATION DE LA MATRICE CIMENT

Nous venons de constater que la carbonatation permet d'atténuer les différences de variations dimensionnelles entre les cycles 1 et 2, mais celles entre les cycles 0 et 1 demeurent. Entre ces deux cycles, les éprouvettes subissent un retrait et un gonflement. Pour l'éprouvette V, le retrait est précédé d'un gonflement. De plus, entre les périodes de retrait et de

gonflement les éprouvettes sont stockées à l'air libre. En définitive, lors des mesures des variations dimensionnelles, les éprouvettes subissent trois types de cure, soit:

- le stockage à l'air libre, noté **A**
- le stockage dans l'enceinte (33°C, 50% HR), noté **R**
- le stockage dans l'eau liquide, noté **G**.

Avant d'entreprendre les mesures des variations dimensionnelles, nous avons fait subir aux éprouvettes une ou plusieurs des trois cures précédentes, ou une de leurs associations. Par chacune des cures, nous indiquons par un chiffre placé avant la lettre caractéristique (A, R, G) la durée en jours de la cure. Nous avons examiné 13 types de cure (mono, di ou tritype). L'ensemble des caractéristiques des éprouvettes ayant subi les cures est donné dans le tableau XXX.

Ep	Cure	B	C	E	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
290	7A	228	396	396	1140	5,5	2,3	1,1	0,8
291	28A	225	392	392	1140	6,7	1,7	0,9	0,8
313	45A	201	365	395	1050	5,4	1,5	1,4	1,0
304	0A+12R	212	350	369	1130	4,2	1,5	1,7	1,0
303	3A+12R	212	369	369	1060	5,9	1,2	1,3	1,2
302	3A+22R	224	390	390	1120	6,4	1,6	1,0	0,6
314	13A+(7A+1G)X4	211	385	417	1140	6,2	1,7	1,1	0,9
305	4A+(3R+3G+3A)	217	395	395	1140	6,9	1,2	0,8	0,9
306	4A+(3G+3R+3A)	219	399	399	1140	7,6	1,5	0,7	0,9
307	4A+(3G+3R+3A)X2	218	397	397	1150	7,0	1,3	0,7	0,7
308	4A+(3G+3R+3A)X3	219	399	399	1160	6,4	1,5	0,7	0,6
319	4A+(3R+3G+3A)+23R	207	377	409	1100	6,1	1,3	0,8	0,4
320	4A+(15R+1G)X2	206	375	406	1090	6,0	0,9	0,7	0,6

Tableau XXX- Influence de la cure sur les caractéristiques des éprouvettes

Après démoulage des éprouvettes, il est nécessaire de les garder à l'air libre durant quelques jours. Toutefois, une durée de 3 à 4 jours semble suffisante, si l'éprouvette est soumise ensuite à une autre cure. Une cure comportant seulement des périodes de stockage à l'air et d'immersion dans l'eau n'est pas suffisante (essai 314). Il est indispensable de placer l'éprouvette dans l'enceinte et les essais 305, 319, 320 montrent que le retrait doit être effectué avant l'immersion. De même, l'étape de retrait doit être suivie d'une étape d'immersion et compte tenu de la porosité des éprouvettes, une durée d'immersion de 1 jour est suffisante. Nos essais ne permettent pas de dire avec précision quelle est la durée optimale de l'étape de retrait. Dans les conditions fixées dans l'enceinte, cette durée est supérieure à 3 jours et probablement inférieure à 15 jours mais il est évident que la durée optimale est liée aux conditions opératoires choisies pour cette cure (température, humidité relative).

En définitive, nous confirmons que l'étape de cicatrisation des éprouvettes correspond à un cycle de mesure des variations dimensionnelles, effectuées sur un même échantillon et dans l'ordre suivant:

- une période de stockage à l'air libre de 3 à 4 jours,
- une période de séchage dans des conditions de température et d'humidité à définir,
- une période d'immersion dans l'eau liquide (une durée de 24 h semble suffisante).

Sans avoir pu le montrer de manière quantitative, nous pouvons dire que la présence de la biomasse végétale lavée et traitée continue à inhiber l'hydratation du ciment, et après démoulage, seule une fraction du ciment est hydratée. La période de stockage à l'air libre permet, lorsque l'échantillon est humide, de poursuivre son hydratation. Cette dernière est limitée probablement par l'existence d'une structure colloïdale limitant la diffusion des espèces ioniques de la réaction d'hydratation. L'opération de séchage doit en déshydratant la structure colloïdale, créer mécaniquement ou chimiquement des microfissures. En immergeant l'éprouvette dans l'eau, les microfissures permettent une poursuite de la réaction d'hydratation. Seules, des analyses fines microscopiques (annexe V) et/ou chimiques permettront de justifier nos hypothèses ou d'apporter de nouvelles interprétations aux évolutions des variations dimensionnelles observées sur

plus de 30 éprouvettes réalisées jusqu'à présent avec le protocole optimal décrit dans le chapitre précédent. Aujourd'hui l'opération de cure mixte semble indispensable pour une exploitation industrielle du matériau. L'objectif final que l'on peut se fixer, est soit de l'éliminer, soit de la simplifier afin que sa mise en oeuvre à l'échelle industrielle soit envisageable.

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A l'issue du travail de recherches de MOUGEL (92) sur les composites bois-ciment non comprimés, notre objectif était d'améliorer le protocole expérimental de fabrication des composites afin qu'il satisfasse aux contraintes techniques suivantes:

- **masse volumique inférieure à 1100 kg/m³**
- **résistance à l'écrasement supérieure à 4 MPa**
- **variations dimensionnelles contrôlées, ne dépassant pas dans les conditions de la norme française 1 mm/m**

On souhaitait également que ce protocole soit généralisable à de nombreuses biomasses végétales tout en gardant au matériau composite un intérêt économique permettant d'envisager une fabrication industrielle.

Notre recherche a répondu en grande partie à l'ensemble de ces objectifs. En effet, le protocole comportant:

- **un lavage éventuel à l'eau chaude ou froide,**
- **une pulvérisation des particules par 10% en masse de bitume B3,**
- **un ajout au ciment d'une masse égale (et peut être supérieure) d'agrégat siliceux de granulométrie adaptée à celle du ciment (C400),**
- **une cure comportant un stockage à l'air libre, un conditionnement dans une enceinte (33°C, 50% HR) et une immersion dans l'eau,**

permet pour les quatre composites étudiés (dont trois avec des produits fortement inhibiteurs de la prise du ciment) de répondre à l'objectif fixé sur le plan technique et à l'échelle du laboratoire.

Il n'est pas interdit de penser qu'il sera encore possible d'améliorer les trois premières étapes, mais à ce jour leur coût et leur mise en oeuvre à l'échelle industrielle ne posent aucun problème. Différents blocs creux, avec un moule industriel voisin de ceux utilisés pour les matériaux de construction en ciment, ont été réalisés par la Société A93 sur la base de notre protocole expérimental. En définitive, la seule étape qui reste critique

sur le plan industriel et économique est l'étape de cure qui permet d'obtenir un composite stabilisé du point de vue des variations dimensionnelles. Nous avons évoqué certaines hypothèses sur les phénomènes qui se produisent durant cette cure. Une priorité doit être donnée pour vérifier ces hypothèses ou pour proposer d'autres interprétations. On pourra certainement alors envisager une optimisation de cette étape et diminuer son coût et sa durée et pourquoi pas la remplacer par un autre traitement. C'est dans cette direction que doivent se poursuivre les recherches sur les composites biomasse végétale-ciment non comprimés. Enfin, il n'est pas exclu que l'ajout d'accélérateurs et que le traitement par carbonatation soient intégrés au protocole, mais à ce jour, ces traitements ne sont pas suffisants pour éviter l'étape de cure même si la carbonatation par CO₂ gazeux permet d'obtenir des variations dimensionnelles stabilisées à l'issue du premier cycle.

NOTATIONS

ν	= coefficient de Poisson
ν_d	= coefficient dynamique de Poisson
θ_c	= température maximale d'hydratation du ciment (°C)
θ_m	= température maximale d'hydratation du mélange biomasse végétale-ciment (°C)
B	= dosage du composite en particules de bois (kg/m ³)
C	= dosage du composite en ciment (kg/m ³)
C-S-H	= oxyde de calcium-silicate-eau
C/E	= rapport ciment/eau
C₂S	= silicate dicalcique
C₃A	= aluminat tricalcique
C₃S	= silicate tricalcique
C₄AF	= alumino-ferrite tétracalcique
Cy 0	= correspond à la somme des valeurs du gonflement de l'éprouvette V et du retrait de l'éprouvette R (mm/m)
Cy 1	= correspond à la somme du premier retrait et du premier gonflement de l'éprouvette R . Pour l'éprouvette V il est égal à la somme du premier retrait et du second gonflement (mm/m)
Cy 2	= correspond aux mêmes conditions du Cy 1, après un deuxième cycle de mesures (mm/m)
E	= dosage en eau du composite (kg/m ³)
E_d	= module d'élasticité dynamique du béton (MPa)
f(ν_d)	= fonction du coefficient dynamique de Poisson
f_{c28}	= contrainte de rupture d'un béton âgée de 28 jours (MPa)
f_l	= fréquence de résonance longitudinale (Hz)
f_f	= fréquence de résonance en flexion (Hz)
GT	= gonflement total du bois (%)
HR	= humidité relative (%)
I	= coefficient d'inhibition du bois vis à vis du ciment
L_{0E}	= dimension avant retrait (mm)
L_{0S}	= dimension avant gonflement (mm)
L_{21E}	= dimension après séchage de 21 jours (mm)

L_{4S}	= dimension après saturation de 4 jours dans l'eau (mm)
LA	= dimension du bois à l'état anhydre (mm)
LO_x	= dimension de l'éprouvette selon l'axe x (mm)
LO_y	= dimension de l'éprouvette selon l'axe y (mm)
LP	= limite de proportionnalité (MPa)
LS	= dimension du bois à l'état saturé (mm)
MOE	= module d'élasticité ou d'Young (MPa)
MOR	= contrainte de rupture (MPa)
MV	= masse volumique du composite (kg/m ³)
P	= charge de rupture (N)
PSF	= Point de saturation des fibres du bois(%)
R	= éprouvette selon laquelle on débute le retrait
R_b	= résistance du béton à la compression (MPa)
R_{bt}	= résistance du béton à la traction (MPa)
R_c	= contrainte de rupture de la pâte de ciment (MPa)
RT	= retrait total du bois (%)
s_c	= pente maximale de la courbe d'hydratation du ciment(°C/h)
s_m	= pente maximale de la courbe d'hydratation du mélange biomasse végétale-ciment (°C/h)
t_c	= temps pour la prise de la pâte de ciment (h)
t_m	= temps pour la prise du mélange bois-ciment (h)
V	= éprouvette selon laquelle on débute le gonflement
VA	= variation dimensionnelle axiale du bois (%)
v_l	= vitesse de propagation ultrasonore longitudinale (m/s)
VR	= variation dimensionnelle radiale du bois (%)
VT	= variation dimensionnelle tangentielle du bois (%)
VV	= variation dimensionnelle volumique totale du bois (%)
ΔL/L	= variation dimensionnelle (mm/m)
ΔLR/LR	= amplitude du retrait (mm/m)
ΔLS/LS	= amplitude du gonflement (mm/m)
ΔLT/LT	= amplitude de la variation dimensionnelle entre les états conventionnels extrêmes (mm/m).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAM M., BENSIMMON J., COQUILLAT G., DARDARE J., DREUX G., FERRIOT J.F., GORISSE F., LESAGE R., PAILLÈRE A.M., TERRIER P., VENUAT M. (1984), Techniques de l'ingénieur : Variétés de bétons et constituants, C 2210, 16p.

AFNOR (1981), "Norme Française NF P 15-301, Liants Hydrauliques: Définitions, classification et spécification des ciments", 11 p.

AFNOR (1983), "Norme Française NF P 14-304, Agglomérés : Blocs en béton cellulaire autoclavés pour murs et cloisons", septembre, 14p.

AFNOR (1986), "Norme Française NF P 14-306, Agglomérés : Blocs en béton cellulaire autoclavés pour murs et cloisons", février, 16 p.

AKERS S.A.S., STUDINKA J.B. (1989), "Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests". The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 11(2), 93-97.

AROLA R.A. (1993), "Chunkrete: an alternative to concrete". *III* : Inorganic bonded wood and fiber composite materials conference, Vol 3, 121-131.

AVRAM C., FACAOARU I., FILIMON I., MIRSU O., TERTEA I. (1981), "Concrete strength and strains". *III*: Developments in Civil Engineering, Elsevier Scientific Publications C², Vol 3, 556 p.

BADEJO S.O.O. (1988), "Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods". Wood Science and Technology, 22, 357-370.

BADEJO S.O.O. (1989), "New trends in wood-cement board research in Nigeria. *III* : IUFRO Seminar of Project Group p5.01 "Properties and utilisation of tropical woods", Côte d'Ivoire, 19 pp.

BAZIRE P., GADANT J. (1991), "La forêt en France". Notes et études documentaires, Edit Blaec, N^o 4928.

BENTUR A., AKERS S.A.S. (1989), "The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment". The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete 11(2), 99-109.

BERALDO A.L. (1987), "Bambucreto- O uso do bambu como reforço do concreto". *III* : XVI-CONBEA-SBEA, Jundiaí, SP, 521-530.

BERALDO A.L. (1990), "Placas cerâmicas armadas com bambu". *III* : XIX-CONBEA-SBEA, Piracicaba, SP, 142-159.

BERGER R.L., YOUNG J.F., LEUNG K. (1972), "Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon dioxide treatment". Nature Physical Science, Vol 240(97), 16-18.

BERGSTRÖM S.G., GRAM H.E. (1984), "Durability of alkali-sensitive fibres in concrete". *III*: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 6(2), 75-80.

BIBLIS E.J., LO C. (1968), "Sugars and others wood extractives: Effect on the setting of southern-pine cement mixtures". Forest Products Journal, 18(8), 28-34.

- BNH/DEPEA (1982)**, "Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra". Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, 72 p.
- BRÖKER F.W., SIMATUPANG M.H. (1973)**, "Dünnschichtchromatographischer Nachweis zement erhärtungsstörender Stoffe". Zement-Kalk-Gips N^o 5, 245-247.
- BRÖKER-F.W, SIMATUPANG M.H. (1974 a)**, "Dimensionsstabilisierung zementgebundener Holzwerkstoffe." Holz als Roh-und Werkstoff , 32, 188-193.
- BRÖKER-F.W, SIMATUPANG M.H.(1974 b)**, "Ursachen der Dimensionsänderung zementgebundener Holzwerkstoffe." Holz als Roh-und Werkstoff, 32,150-155.
- BRUERE G.M., NEWBEGIN J.D. (1967)**, "Some aspects of the drying shrinkage of concrete containing chemical admixtures". ^{II}: International Symposium on admixtures for mortar and concrete, RILEM, ABEM, Report IV/5, Brussels, 61-67.
- BUCUR V. (1980)**, "Anatomical structure and some acoustical properties of resonance wood". The Catgut Acoustical Society Newsletter, N^o 33, 24-29.
- BUCUR V. (1983)**, "An ultrasonic method for measuring the elastic constant of wood increments cores bored from living trees". Ultrasonics, May, 116-126.
- BUCUR V. (1988)**, "Wood structural anisotropy estimated by acoustic invariants". IAWA Bulletin, 9(1), 67-74.
- BUGNA J., VASEY P., VETSCH T. (1981)**, "Le bois-ciment: un substitut possible à l'amiante-ciment?". Chantiers/Suisse, Vol 12, 37-42.
- CASU B., CHIRUZZI M.,TEGIACCHI T., ZOPPETTI G. (1980)**, "Interaction of aluminates with carbohydrates and aldonates". ^{III} : 7th International Symposium of Chemical Cement, Paris, Vol IV, 558-563.
- CATHARIN P. (1978 a)**, "Hydratationswärme und Festigkeitsentwicklung. Teil 1". Betonwerk, Fertigteile-Technik, 10, 539-544.
- CATHARIN P. (1978 b)**, "Hydratationswärme und Festigkeitsentwicklung. Teil 2". Betonwerk, Fertigteile-Technik, 12, 729-733.
- CEPED (1982)**, "Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra". Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, BNH/DEPEA, RJ, Brasil, 72 p.
- COUTTS B. (1993)**, "Wood fiber inorganic composites-The Australien scene 1970' S-1990'S ", ^{III} : Inorganic bonded wood and fiber composite materials conference, Vol 3, 26-27.
- CTBA (1972)**, "Pin maritime et hêtre", Fiches de documentation sur les principales essences de pays tempérés, 14 p.
- CTBA (1991)**, "Bois statistiques", 40 p.
- CTFT (1989)**, "Méthode acoustique pour l'évaluation instantanée du module d'élasticité du bois". ^{III} : Colloque IUFRO, P 5.01, Yamoussoukro, 14 p.
- CURTIS J.O., HANSEN E.L. (1974)**, "Fiber-reinforced concrete for farm". Oklahoma State University, Stillwater, Paper N^o 74-4046, 9p.

- DALCQ P. (1987)**, "Effets d'accélérateurs exempts de chlorure sur la prise du ciment et le durcissement du béton". **II**: Colloque International sur les adjuvants des mortiers et bétons, Bruxelles, Rapport IV/17-RILEM-ABEM, 299-318.
- DE SIMONE D. (1939)**, "Norme, materiali e strutture per la limitazione dell'impiego del ferro nelle costruzioni-Substitutes for steel in reinforced concrete construction". **Royal Engineers Journal**, 54, 237-247.
- DE SOUZA M.R. (1992)**, "Cement-bonded particleboard made with carbon dioxide gas: an exploratory study". **II**: MSc Thesis, University of Idaho, Paper 1.
- DE SOUZA M.R. (1992)**, "Effect of carbon dioxide gas in manufacturing cement-bonded particleboards". **II**: MSc Thesis, University of Idaho, Paper 2.
- DINWOODIE J.M., PAXTON B.H. (1984)**, "Wood-Cement Particleboard: A technical assessment". **Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium**, 40, 217-227.
- DIX R.J.H.R. (1988)**, "The principles of cement-bonded particleboards manufacture". **II** : International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Vol 1, 136-139.
- DOAT J. (1985)**, "Un nouveau produit énergétique pour les pays en développement: Le bois torréfié". **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, N^o 208, 57-67.
- DORLOT J.M., BAILON J.P., MASOUNAVE J. (1986)**, "Des matériaux". Edit Montréal, Ecole Polytechnique, 2^a ed, Chap 13.7, 406-451.
- DREUX G. (1986)**, "Nouveau guide du béton". Edit. Eyrolles, Chap. V- VIII.
- DUTRUEL F., GUYADER R. (1975)**, "Étude de la corrosion des canalisations en béton". **CERIBM, Monographie n^o 7**, 66 p.
- FENGEL D., SHAO X. (1984)**, "A chemical and ultrastructural study of the bamboo species *Phyllostachys makinoi* Hay.". **Wood Science and Techn.**, 18, 103-112.
- FISCHER V.F., WIENHAUS O., RYSSEL M., OLDBRECHT J. (1974)**, "The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards". **Holztechnologie**, 15(1), 12-19.
- GHAVAMI K. (1988)**, "Application of bamboo as a low-cost construction material". **II**: Bamboos Current Research, Proceedings of International Bamboo Workshop, 270-279.
- GHAVAMI K. (1992)**, "Bambu: um material alternativo na Engenharia". **Revista Engenharia**, 492, 23-27.
- GHAVAMI K., HOMBECK R.V. (1981)**, "Application of bamboo as a construction material". **Proceedings of the Latin America Symposium Applied to Low Cost Housing, IPT CIB, SP, Brasil**, 49-66.
- GEIMER R.L., SOUZA M.R., MOSLEMI A.A., SIMATUPANG M.H. (1993)**, "Carbon dioxide application for rapid production of cement particleboard". **II**: Inorganic bonded wood and fiber composite materials conference, Vol 3, 31-41.

- GLENN H.E. (1950)**, "Bamboo reinforcement of Portland cement concrete structures"; Clemson College Engineering Experimental Station, Clemson, South Carolina, 123-127.
- GOMIDE J.L., VIVONE R. L., GALA P.A.M. (1988)**, "Bambu: uma alternativa para o déficit de celulose de fibra longa no Brasil?". In: 21^o Congresso Anual de Celulose e Papel da ABCP, SP, Brasil, 16 p.
- GRAM H.E. (1986)**, "Durability studies of natural organic fibres in concrete, mortar on cement". In: RILEM Symposium on developments in fibre reinforced cement and concrete". Vol 2, 13-17.
- GOODBRAKE C.J., YOUNG J.F., BERGER R.L. (1979)**, "Reactions of hydraulic calcium silicates with carbon dioxide and water". Journal of the American Ceramic Society. Vol 62(9-10), 488-491.
- GROSSER D., LIESE W. (1971)**, "On the anatomy of Asian bamboos, with special references to their vascular bundles". Wood Science and Technology, 5, 290-312.
- GROSSER D., ZAMUCO JR G. (1971)**, "Anatomy of some bamboos species in the Philippines". Separate from the Philippine Journal of Science, 100(1), 57-70.
- GROSSER D., LIESE W. (1973)**, "Present status and problems of bamboo classification". Journal of the Arnold Arboretum, 54(2), 293-307.
- GUITARD D., MORLIER P., THIBAUT B. (1991)**, "De la diversité forestière aux composites à base de bois: Esquisse d'une stratégie pour le XXI e siècle". Revue Bois et Forêts des tropiques, 227, 57-61.
- HACHMI M. (1987)**, "Important considerations in wood-cement compatibility. Ph D Dissertation, Faculty of Hassan II, Morocco.
- HACHMI M., CAMPBELL A.G. (1988)**, "Wood-cement chemical relationships". In: International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Vol 1, 43-47.
- HACHMI M., MOSLEMI A.A. (1989)**, "Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives". Forest Products Journal, 39(6), 55-58.
- HAINES D. (1993)**, "Les méthodes acoustiques d'essai des bois de lutherie". Conférence, Mirecourt, Juin, 23 p.
- HANNANT D.J. (1984)**, "Fibre reinforced cement and concrete. Part 2: Practical composites". Concrete, March, 21-22.
- HARPER S. (1982)**, "Developing asbestos-free calcium silicate building boards". Composites, April, 123-128.
- HOENE M. (1993)**, "Wood cement block technology". In: Inorganic-bonded wood and fiber composites materials, Vol 3, 51-53.
- HOFSTRAND A.D., MOSLEMI A.A., GARCIA J.F. (1984)**, "Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement". Forest Products Journal, 34(2), 57-61.

HOLDERNESS S. (1990), "Marketing and opportunities for cement-bonded particleboards: lesson from great Britain and North America". **I³** : Inorganic bonded wood and fiber composite materials conference, Vol 2, 129-132.

IRLE M., SIMPSON H. (1993), "Agricultural residues for cement-bonded composites". **I³** : Inorganic bonded wood and fiber composite materials conference, Vol 3, 54-58.

JAIN V.K., SHUKLA K.S., KUMAR S. (1989), "Heat of hydration studies on cellulosic materials and cement systems". J. Timb. Develop. Assoc. (Inde), Vol. XXXV(2), 19-32.

JIAN Z.H., MING Y.Y. (1992), "Prospects for substituting bamboo-based products to wood in Yunnan". **I³**: X World Forest Congress, Paris, 6, 479-483.

JINDAL V. C. (1986), "Development and testing of bamboo-fibres reinforced plastic composites". Journal of Composite Materials, 20, 19-29.

JOISEL A. (1967), "Activité chimique des adjuvants: accélérateurs et retardateurs". **I³**: Colloque International sur les adjuvants des mortiers et bétons, Bruxelles, Ag/Sept, 39-55.

JONES R. (1967), "Les essais non destructifs du béton". Editions Eyrolles, 165 p.

JONES R., FACAOARU I. (1968), "An analysis of answers to a questionnaire on the ultrasonic pulse technique". Matériaux et Constructions, Vol 1, N^o 5, 457-465.

JONES R., FACAOARU I. (1969), "Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method". Matériaux et Constructions, Vol 2, N^o 10, 275-284.

JONES R., FACAOARU I. (1971), "Incercearea nedestructiva a Betonului". Editura Tehnică, Bucuresti, 466 p.

KALAFATIS P., COOPER R.J., SMITH C. (1989), "The promotion of a new type of particleboard to architects- the case of COMPAK". Journal Inst. Wood Science, 11(5), 186-192.

KAVVOURAS P.K. (1987), "Suitability of *Quercus conferta* wood for the manufacture of cement-bonded flakeboards". Holzforschung, 41(3), 159-163.

KAYAHARA M., TAJIKA K., NAKAGAWA H. (1979), "Increase of strength of cement-wood composites". Mokuzai Gakkaishi, 25(8), 552-557.

KELLER R. (1988), "Bois massifs et reconstitués". ENGREF, 22 p.

KENNER J., RICHARDS G.N. (1954), "The degradation of carbohydrates by alkali. Part IV. 1-0-Methylfructose, Glucose, and Fructose". Journal of Chemical Society, London, Vol IV, 1784-1789.

KOHNO K., SUGIMOTO A., KASHIWAI T. (1988), "Study of high strength concrete containing finely ground silica and red mud". CAJ Review, 112-115.

KOLIAS S., WILLIAMS R.T.I.(1980), "Relationships between the static and the dynamic moduli of elasticity in cement stabilised materials". Matériaux et Constructions. Vol. 13, N^o 74, 99-107.

KUMAR S., DOBRIYAL P.B. (1992), "Treatability and flow path studies in bamboo. Part I: *Dendrocalamus strictus* NEES". Wood and Fiber Science, 24(2), 113-117.

KUMAR S., DOBRIYAL P.B. (1993), "Treatability classification of hardwoods". Wood and Fiber Science, 25(2), 192-197.

KUROKI Y., NAGATOMI. W., YAMADA J. (1988), "Manufacture of lighth-weight cement-bonded particleboard in Japan". *II* : Inorganic bonded wood and fiber composite materials, Vol 1, 136-142.

LACHAUD R., SALOMON M. (1984), "Les altérations des bétons". *II*: Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N^o 428, Oct, 44-48.

LAHTINEM P.K. (1993), "Experience with cement-bonded manufacturing when using a short-cycle press line". *II* : Inorganic bonded wood and fiber composite materials, Vol 3, 32-34.

LANGE H., SIMATUPANG.M.H. (1984), "Der Einfluß des Trocknungsgrades der Holzpäne auf die Festigkeit zementgebundenen Spanplatten". Holz als Roh-und Werkstoff,42, 421-423.

LANGE H., SIMATUPANG.M.H. (1985), "Herstellung von zementgebundenen Fichten-und Pappelspanplatten: Wechselwirkungen von fünf Einflußfaktoren und ihre Wirkung auf die Plattenfestigkeit". Holz als Roh-und Werkstoff,43, 229-236.

LANGE H., SIMATUPANG.M.H, NEUBAUER A. (1988), "Influence of latent hydraulic binders on the properties of wood-cement composite". *II* : International Conference on fiber and particleboards bonded with inorganic binders, Oct, Hamburg, 48-52.

LEE A.W.C. (1984), "Physical and mechanical properties of cement bonded southern pine excelsior board". Forest Products Journal, 34(4), 30-34.

LEE A.W.C. (1990), "The latest developments in the cement-bonded wood excelsior (wood wool) board industry".*II*: Inorganic bonded wood and fiber composite materials, Vol 2, 103-107.

LEE A.W.C., HONG Z. (1986), "Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of cement-wood compatibility". Forest Products Journal, 36(11/12), 87-90.

LEE A.W.C., HONG Z., PHILLIPS D.R., HSE C.Y. (1987), "Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures". Wood and Fiber Science, 19(3), 262-268.

LEE A.W.C., SHORT P.H. (1989), "Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board". Forest Products Journal, 39(10), 68-70.

LEE A.W.C., HSE C.Y. (1993), "Evaluation of cement-excelsior boards made from yellow-poplar and sweetgum". Forest Products Journal, 43(4), 50-52.

LEMPFER K., SATTLER H. (1988), "Long-term performance of cement-bonded particleboard and fireboard". *II*: Inorganic fiber and particleboard bonded with inorganic binders, Vol 1, 125-132.

- LIEBER V.W., RICHARTZ W. (1972)**, "Einfluß von Triäthanolamin, Zucker und Borsäure auf das Erstarren und Erhärten von Zementen". *Zement-Kalk-Gips*, nº 9, 403-409.
- LIESE W. (1987)**, "Research on bamboo". *Wood and Science Technology*, 21(3), 189-209.
- LIGNUM (1960)**, "Bases technologiques/Matériaux dérivés du bois/Matériaux à base de particules de bois et de liant mineral". Zurich, 9 p.
- LIMOSIN M.D. (1981)**, "Les bétons : L'accélération de la prise et du durcissement des bétons". *III: Encyclopédie du Bâtiment*, Editions Eyrolles, 2153, 16 p.
- LOPEZ O.H. (1974)**, "Bambu-su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, construcción, Arquitectura, Ingeniería, Artesanía". *Estudios Tecnicos Colombianos Ltda*, Cali, Colombia, 318 p.
- LOPEZ O.H. (1978)**, "Nuevas técnicas de construcción con bambú". Univ. Nacional de Colombia, *Estudios Tecnicos Colombianos Ltda*, 137 p.
- MAEKAWA E., KITAO K. (1965)**, "Hemicellulose from bamboo stems". *Mokuzai KenKyu*, 34, 100-104.
- MEYERS S. L. (1949)**, "Effects of carbon dioxide on hydrated cement and concrete". *Rock Products*, Jan, 96-98.
- MILESTONE N.B. (1977)**, "The effect of glucose and some glucose oxidation products on the hydration of tricalcium aluminate". *Cement and Concrete Research*, Vol 7(1), 45-52.
- MILLER D.P., MOSLEMI A. A. (1991)**, "Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength". *Wood and Fiber Science*, 23(4), 472-482.
- MINISTERE DE L'URBANISME ET DU LOGEMENT (sd)**, "Les bétons de sable" ., CETE du Sud-Ouest, CETE de Rouen, 67 p
- MOSLEMI A.A. (1988 a)**, "Inorganically bonded wood". *CHEMTECH*, Aug, 504-510.
- MOSLEMI A.A. (1988 b)**, "Wood-cement panel products: coming of age". *III: Inorganic fiber and particleboard bonded with inorganic binders*, Vol 1, 12-18.
- MOSLEMI A.A (1990)**, "Mineral bonded wood composites: emerging technologies.", *IUFRO, XIX World Congress*, Montréal, 299-312.
- MOSLEMI A.A., GARCIA J.F., HOFSTRAND A.D. (1983)**, "Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems". *Wood and Fiber Science*, 15(2), 164-176.
- MOSLEMI A.A., LIM Y.T. (1984)**, "Compatibility of southern hardwoods with Portland cement". *Forest Products Journal*, 34(7/8), 22-26.
- MOSLEMI A.A., PFISTER S.C. (1987)**, "The Influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels". *Wood and Fiber Science*, 19(2), 165-175.

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, ESSTIB, 160 p.

ONU (1972), "The use of bamboo and reeds in building construction". United Nations, Dep. of Economic and Social Affairs, 95 p.

PARAMESWARAN N, BRÖKER F.W., SIMATUPANG M.H. (1977), "Zur Mikrotechnologie mineralgebundener Holzwerkstoffe wechselwirkung zwischen Bindemitteln und Holz". Holzforschung, 31(6), pp 173-178.

PAZNER L., KLEMAREVSKI A. (1988), "New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement". **II**: International Conference on fiber and particleboards bonded with inorganic binders, Idaho, USA, 26-30.

PONT-A-MOUSSON S. A. (1975), "Formulaire", 2^{ème} édition, 130-137.

PREZIOSA C. (1982), "Méthode de détermination des constantes élastiques du matériau bois par l'utilisation des ultrasons". Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Orléans, 96 p.

PUGEL A.D., PRICE E. W., HSE C.Y. (1990), "Composites from southern pine juvenile wood. Part 2. Durability and dimensional stability". Forest Products Journal, 40(3), 57-61.

RADUANY I.A. (1974), "Recherches conductimétriques concernant l'influence des adjuvants sur les phénomènes d'hydratation et d'hydrolyse des ciments siliceux". **II**: **IInd** International Symposium "New developments in non-destructive testing of non-metallc materials", Vol II, 43-48.

RASHWAN M.S., HATZINIKOLAS M., ZMAVC R. (1992), "Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue". Forest Products Journal, 42, 57-64.

READING T. J. (1985), "Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces". Concrete International, Nov, 57-62.

ROSS R. J., PELLERIN R. F. (1988), "NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves". Forest Products Journal, 38(5), 39-45.

ROY D. M., SCHEETZ B. E., SILSBEE M. R. (1993), "Processing of optimized cements and concretes via particle packing". **II**: Advanced cement-based materials, MRS Bull., March, 45-49.

ROWELL R.M., TILLMAN A.M., ZHENG TIAN L. (1986), "Dimensional stabilization of flakeboard by chemical modification". Wood Science Technol., 20, 83-95.

ROWELL R.M., NORIMOTO M. (1988), "Dimensional stability of bamboo particleboards made from acetylated particles". Mokuzaï Gakkaishi, 34(7), 627-629.

ROWELL R.M., KEANY F.M. (1991), "Fiberboards made from acetylated bagasse fiber". Wood and Fiber Science, 23(1), 15-22.

ROWELL R.M., YOUNGQUIST J.A., ROWELL J.S., HYATT J.A. (1991), "Dimensional stability of aspen fiberboard made from acetylated fiber". Wood and Fiber Science, 23(4), 558-566.

- ROWELL R.M., SPELTER H., AROLA R. A., DAVIS P., FRIBERG T., HEMINGWAY R. W., RIALS T., LUNEKE D., NARAYAN R., SIMONSEN J., WHITE D. (1993)**, "Opportunities for composites from recycled wastewood-based resources: a problem analysis and research plan". *Forest Products Journal*, 43(1), 55-63.
- SANDERMANN W., PREUSSER H. J., SCHWIENS W. (1960)**, "The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials". *Holzforschung*, 14(3), 70-77.
- SANYAL S.N., GULATI A.S., KHANDURI A.K. (1988)**, "Strength properties and uses of bamboo-A review". *Indian Forester*, 114(10), 637-649.
- SARJA A. (1989 a)**, "Structural wood-fiber concrete". *Concrete International*, 07, 45-49.
- SARJA A. (1989 b)**, "Structural wood fibre concrete technology". In: VTT Symposium, 43rd General Council Meeting, RILEM, 50-60.
- SCHMIDT E. (1988)**, "Requirements and demands for further processing of cement-bonded boards". In: International Congress on fiber and particleboard bonded with the inorganic binders, Vol. 2, 88-90.
- SCHNIEWIND A.P. (1989)**, "Bamboo". In: *Concise Encyclopedia of Wood & Wood-based materials*, Ed Pergamon Press, 19-27.
- SCHUBERT.B., WIENHAUS.O., BLOBFELD O. (1990)**, "Untersuchungen zum System Holz-Zement. Einfluß unterschiedlicher Zementarten auf das Abbindeverhalten von Holz-Zement-Mischungen". *Holz als Roh-und Werkstoff*, 48, 185-189.
- SCHWARZ H.G. (1988)**, "Cement-bonded boards in Malaysia". In: International Congress on fiber and particleboard bonded with the inorganic binders, 91-92.
- SCHWARZ H. G., SIMATUPANG M.H. (1984 a)**, "Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Portlandzement auf die Druckfestigkeit von Versuchskörpern aus Zement und Fichten- oder Buchenspänem". *Holz als Roh-und Werkstoff*, 41, 65-69.
- SCHWARZ H.G., SIMATUPANG M.H. (1984 b)**, "Eingnung des Buchenholzes zur Herstellung zementgebundener Holzwerkstoffe". *Holz als Roh-und Werkstoff*, 42, 265-270.
- SHARMA S.N. (1988)**, "Seasoning behaviour and related properties of some Indian species of bamboo". *Indian Forester*, 114(10), 613-621.
- SHIGEKURA Y., TAKAHASI K. (1979)**, "Study on the improvement of excelsior board-A trial of gypsum excelsior board". *Science University of Tokio*, 258-260.
- SHIMADA H. (1939)**, "A chemical study of the bamboo used in concrete". *TIJA*, 13, 17-25.
- SHIN F. G., XIAN X. J., ZHENG W. P., YIPP M. W. (1989)**, "Analyse of the mechanical properties and microstructure of bamboo-epoxy composite". *Journal of Material Science*, 24(10), 3483-3490.
- SHUKLA K.S., PRASAD J. (1988)**, "Reconstituted wood from bamboo for structural uses". *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 19(1), 19-27.

- SIMATUPANG M.H. (1979)**, "Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebundener Holzspanplatten". Holz als Roh-und Werkstoff, 37, 379-382.
- SIMATUPANG M.H.(1986)**, "Abbaureaktionen von Glucose, Cellobiose und Holz unter dem Einfluß von Portlandzementmörtel". Holzforschung, 40(3), 149-155.
- SIMATUPANG M.H. (1987)**, "Manufacturing process and durability of cement-bonded wood composites". **II**: Fourth International Conference on Durability of Building Materials & Composites. Singapore, 128-135.
- SIMATUPANG M.H., SCHWARZ H.G., BRÖKER F.W. (1978)**, "Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites". **II**: 8th World Forestry Congress, Vol 6, Jakarta, October, 98-120.
- SIMATUPANG M. H., LANGE H., KASIM A., SEDDIG. N. (1988)**, "Influence of wood species on the setting of cement and gypsum". **II**: International Congress on fiber and particleboard bonded with the inorganic binders, Vol 1, 33-42.
- SIMATUPANG M. H., HABIGHORST C. (1993)**, "The carbon dioxide process to enhance cement hydration in manufacturing of cement-bonded composites-comparison with common production method". **II**: Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, Vol 3, 114-120.
- SIMATUPANG M. H., SEDDIG. N., HABIGHORST C., GEIMER R.L. (1993)**, "Technologies for rapid production of mineral-bonded wood composite boards". **II**: Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, Vol 3,
- SINAGA S.M.; INKIRIWANG J.W.; WARASDIMULYA I. (1993)**, "Production and application of hollow fiber concrete panel". **II**: Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, Vol 3, 132-135.
- SINCLAIR A. N., FARSHAD M. (1987)**, "A comparison of three methods for determining elastic constants of wood". Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, 15(2), 77-86.
- SINGH S.P., JOSHI H.C. (1988)**, "Plywood adhesives from black liquor of bamboo (*D. strictus*)". Journal of the Indian Academy of Wood Science, 19(1), 47-51.
- SMITH P.D., SHRIVENHAM U.K., AMEDOH A., NANA-ACHEAMPONG H., BAYLEY W.A. (1979)**, "Bamboo fibre as reinforcing material in concrete". Appropriate Technology, 6(2), 8-10.
- SORFA P. (1984)**, "Properties of wood-cement composites". Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium, 40, 209-216.
- STUBBLEFIELD D.J., FALCONER J.P.R., MOORE T.B. (1973)**, "Innovative urethane foam composites for housing". Journal of Cellular Plastics, July/August, 160-170.
- TACHI. M., NAGADOMI W., TANGE J., YASUDA S., TERASHIMA N. (1988.)**, "Manufacture of wood-cement boards II. Cement-bonded particles boards from Malaysian fast-growing trees". Mokuzai Gakkaishi, Vol 34, 761-764.
- TACHI. M., TANGE J., NAGADOMI W., SUZUKI Y., TERASHIMA N., YASUDA S. (1989)**, "Manufacture of wood-cement boards IV. Cement-hardening inhibitory components of Malaysian fast-growing tree, *Acacia mangium*". Mokuzai Gakkaishi, Vol 35, 731-735.

- TAMOLANG F.N., VALBUENA R.R; LOMIBAO B.A; KALAW C.L., LINDAYEN T.M., DE VELA B.C. (1960)**, "Fiber dimensions of certain Philippine woods, bamboos, agricultural crops and wastes, and grasses". TAPPI,43(6), 527-534.
- TREGNARD Y. (1980)**, "Comparaison et interprétation de courbes obtenues par porosimétrie au mercure sur diverses essences de bois". Holzforschung, 34, 139-146.
- UEDA K. (1981)**, "Bamboo industry in Japan, Present and Future". *III*: XVII IUFRO World Congress-Division 5, 245-255.
- VALENZUELA W. A. (1989)**, "Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment". Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, 135 p.
- VENUAT M. (1978)**, "Ciment et bétons: Que sais-je?". PUF Paris, N^o1339, 3^{ed.}, 12-95.
- VENUAT M. (1983)**, "Des fibres pour alléger et renforcer le béton". Cahiers Techniques du Bâtiment, N^o 58, Nov., 59-70.
- VENUAT M. (1984)**, "Adjuvants et traitements: techniques modernes d'amélioration des ouvrages en béton". Edit. M. Venuat, 1^{ère} Edit.
- VERBECK G. (1985)**, "Carbonation of hydrated Portland cement". ASTM Special Technical Publication, 205(17), 17-36.
- XUHE C., KELIN Y. (1990)**, "Composite products from non-wood fibrous raw materials". *II*: XIX World Congress-IUFRO, Canada, Vol I, 325-334.
- WEATHERWAX R.C., TARKOW H.(1964)**, "Effect of wood on setting of Portland cement". Forest Products Journal, 14(2), 567-570.
- WEATHERWAX R.C., TARKOW H. (1967)**, "Effect of wood on the setting of Portland cement: Decayed wood as an inhibitor". Forest Products Journal, 17(7), 30-32.
- WIENHAUS O. (1979)**, "Werkstoffe aus Holz und Zement". Holztechnologie, 20(4), 207-215.
- YAMAGISHI K. , KOMAZAWA K, KASAI A., NUNOMURA A. (1980)**, "Fabrication des panneaux en bois-ciment utilisant un bois de mauvaise prise. 1. Influence d'un prétraitement des particules de mélèze avec de l'huile et des produits chimiques". J. Hokkaido Forest Products Research Inst., Asahigawa, Japan, 7, 6-10
- YASIN S.M., QURESHI T.A. (1989)**, "Quantity of water solubles in some hardwoods species (a basis for they relative suitability in wood cement boards)". Pakistan Journal of Forestry, 39(2), 103-106.
- YASUDA S., IWASE Y., SEGUCHI Y., TAKEMURA T., MATSUSHITA Y. (1992.)**, "Manufacture of wood-cement boards V. Cement-hardening inhibitory components of sugi heartwood and behavior of catechol as a simple inhibitor model with vicinal phenolic hydroxyl groups in cement paste". Mokuzai Gakkaishi, 38(1), 52-58.
- YOUNG J.F. (1993)**, "Research on cement-based materials: Expanding our horizons". *III*: Advanced cement-based materials, MRS Bull., March, 33-34.

YOUNG J.F., BERGER R.L., BREESE J. (1974), "Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂". Journal of The American Ceramic Society, 57(9), 394-397.

ZHENG TIAN L., MOSLEMI A.A. (1985), "Influence of chemical additives on the hydration characteristics of Western Larch wood-cement-water mixtures". Forest Products Journal, 35(7), 37-43.

ZIMBELMANN R. (1978), "Zur Frage der Festegkeitssteigerung bei Beton". Betonwerk+Fertigteil-Technik, N^o 2, 89-96.

ANNEXES

ANNEXE I

COMPORTEMENTS ACOUSTIQUES DU BOIS ET DU BETON

I.1- COMPORTEMENT ACOUSTIQUE DU BOIS

D'une façon simplifiée, on peut considérer le bois comme étant constitué de trois plans de symétrie perpendiculaires entre-eux. On distingue la direction radiale (**R**), la direction tangentielle (**T**), et la direction longitudinale ou axiale (**L**), représentées sur le figure I-1. Le bois est un matériau composite dont les constituants principaux sont des "agrégats", tels que les cellules de parenchyme, les rayons ligneux, les trachéides (dans le cas des conifères) ou les fibres et les vaisseaux (dans le cas des feuillus).

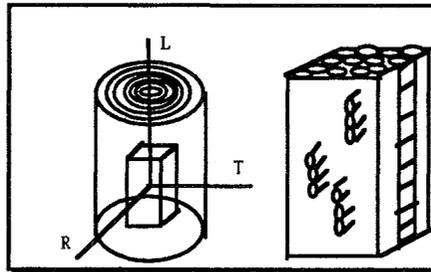


Figure I-1- Disposition des éléments du bois

La disposition des éléments anatomiques selon des directions préférentielles, ainsi que les différentes proportions entre ces éléments, conduit à un comportement hétérogène vis à vis d'une stimulation acoustique. D'une manière générale, la propagation selon l'axe longitudinal (V_{LL}) présente une valeur plus élevée par rapport à celles observées selon les deux autres axes de symétrie, surtout du fait de l'orientation axiale des fibres (BUCUR, 1988). La valeur de la vitesse selon l'axe radial (V_{RR}) est plus élevée par rapport à celle obtenue selon l'axe tangential (V_{TT}).

Dans la notation V_{IJ} , le premier sous-indice indique la direction **I** de propagation de l'onde, tandis que le deuxième sous-indice est relatif à la direction **J** de polarisation de l'onde transversale. Le tableau I-1 présente

les données des vitesses de propagation (en m/s) obtenues selon les différents axes et les différentes polarisations.

Bois	ρ (kg/m ³)	V _{LL}	V _{RR}	V _{TT}	V _{TR}	V _{LT}	V _{LR}
Peuplier	326	5074	2200	1210	642	1250	1536
Epicéa	485	6000	2150	1600	330	1240	1320
Pine	580	5000	2100	1200	600	1030	1050
Pau brasil	932	4935	2435	2034	1006	1280	1294

Tableau I-1 - Vitesses de propagation dans le bois (m/s) (D'après BUCUR, 1988)

Si la comparaison des différentes vitesses obtenues pour la même espèce confirme les hypothèses de propagation des ondes dans le bois ($V_{LL} \gg V_{RR} > V_{TT}$), en revanche, la comparaison entre les différentes espèces n'est pas évidente. La vitesse de propagation dépend de la masse volumique du bois. Toutefois, il ne faut pas oublier l'influence des aspects liés à l'anatomie particulière de chaque espèce, surtout lors de la comparaison entre un résineux et un feuillu. De par la simplicité de leur aspect anatomique, qui entraîne une réduction des pertes d'énergie pendant la propagation, les résineux présentent des valeurs élevées des constantes élastiques (BUCUR, 1980).

Dans un même plan de symétrie, les valeurs des vitesses de cisaillement V_{IJ} (avec $I < J$) sont différentes. On trouve, par exemple, des différences entre les valeurs des vitesses V_{LR} et V_{RL} , entre V_{LT} et V_{TL} , et entre V_{RT} et V_{TR} . Il ne faut pas oublier l'influence de l'anatomie de l'espèce, principalement en présence des rayons ligneux.

Certains chercheurs proposent (PREZIOSA, 1982; BUCUR, 1983, 1984, 1988; ROSS et PELLERIN, 1988) des formules théoriques permettant de calculer les constantes élastiques du bois (C_{IJ}). A partir de la mesure du temps de passage d'une impulsion sonore dans une éprouvette de longueur connue, on calcule la vitesse de propagation de l'onde (v_{IJ}). Considérant

une éprouvette de masse volumique MV , les constantes élastiques sont obtenues par la relation suivante:

$$C_{\nu} = MV * (v_{\nu})^2$$

BUCUR (1983) a étudié les constantes élastiques du hêtre (*Fagus sp*) par analyse aux ultrasons, réalisée sur des carottes de sondage. Les résultats obtenus ont été comparés avec les essais mécaniques classiques en flexion statique. L'auteur a trouvé une bonne corrélation entre les deux méthodes, ce qui lui a permis d'évaluer les résistances mécaniques à partir de l'analyse des arbres sur pied. Toutefois, il a confirmé que les valeurs étaient d'environ 8% plus élevées que celles obtenues lors des essais classiques.

SINCLAIR et FARSHAD (1987) ont comparé trois méthodes de détermination des constantes élastiques du bois: méthode de la flexion statique, méthode de la fréquence de résonance et celle de la vitesse de propagation. Ils ont conclu que les méthodes de transmission sonores sont plus performantes pour indiquer la présence de défauts tels que fissures, pourritures, etc. (qui perturbent la transmission sonore), tandis que la méthode de flexion statique était plus adéquate pour détecter des défauts locaux. Cependant, ils ont affirmé que les comparaisons ne sont pas faciles à réaliser, car les déformations enregistrées par les éprouvettes pendant les essais suivent des axes différents. En effet, les déformations de l'éprouvette en flexion statique se propagent selon son axe transversal, tandis que la propagation de l'onde s'effectue selon l'axe longitudinal.

I-2 COMPORTEMENT ACOUSTIQUE DU BETON

Le béton n'est pas un matériau inerte si l'on considère ses constituants fondamentaux. Les réactions chimiques qui permettent son durcissement, se poursuivent pendant un temps très long (en fonction de son épaisseur, et des conditions ambiantes). De tels changements sont susceptibles d'influencer la mesure des vitesses. Les figures I-2 à I-5 ont été réalisées à partir des données présentées par DURAND (1975). Il a étudié les caractéristiques de 18 bétons de composition différente, par la méthode des impulsions ultrasonores. Ces bétons étaient différents, par leur proportion de ciment (250 kg/m³ jusqu'à 450 kg/m³), par des différences dans les quantités d'agrégats, par l'utilisation de différents ciments et par

le type de conditionnement des éprouvettes (exposition à l'air ou immersion dans l'eau).

Sur les figures suivantes, on peut voir quels sont les paramètres qui ont une influence importante sur les résultats obtenus lors des essais non-destructifs. La quantité de ciment est la même pour toutes les éprouvettes (350 kg/m^3).

a) Effet du vieillissement : La propagation de la vitesse ultrasonore et la résistance mécanique augmentent très rapidement pendant les premiers jours, et plus intensivement lors des premières heures. De tels changements sont dus aux réactions chimiques d'hydratation des constituants du ciment. Toutefois, au fur et à mesure que le temps passe, la vitesse de propagation augmente proportionnellement moins vite que la résistance. Nous pouvons observer dans la plupart des cas un aplatissement de la courbe, principalement dans le cas des vitesses de propagation. Cet effet peut être encore plus évident si on mesure les vitesses quelques heures après le mélange des constituants. JONES (1967) et JONES et FACAOARU (1969) ont affirmé que l'on ne peut pas évaluer la résistance avec une précision acceptable, si on analyse la région aplatie de la courbe de vieillissement.

b) Influence du rapport eau/ciment : Théoriquement le ciment a besoin d'un minimum de 25% de son poids en eau pour s'hydrater. Cependant, on ajoute une quantité supplémentaire d'eau pour faciliter le moulage. L'excès d'eau entraîne des actions néfastes sur le béton, car le pourcentage du volume poreux augmente et a pour conséquence, une réduction de la résistance mécanique et de la vitesse de propagation. KAPLAN (1959), cité par JONES (1967), a conclu que pour les bétons de faible ou de moyenne résistance, les variations produites par le vieillissement ou par le changement du rapport eau/ciment, permettent l'obtention d'une même corrélation avec la vitesse d'impulsion ou la résistance mécanique.

c) Influence des conditions de traitement: Les conditions particulières dans lesquelles les éprouvettes ont été conditionnées peuvent influencer les résultats. Pour les bétons ayant la même composition, la vitesse la plus grande serait obtenue sur l'éprouvette qui aurait subi une cure dans un milieu humide. Dans le cas présent, l'humidité peut jouer un rôle positif sur les caractéristiques du béton, principalement lors des premiers jours, en catalysant les réactions de durcissement. JONES et FÄCÄOARU (1971) ont

conclu que la plus grande partie des variations de vitesse et de la résistance se déroulent entre le quatrième et le cinquième jours de durcissement pour un béton placé dans l'air, et aux environs du septième jour pour un béton placé dans un milieu humide.

CHEFDEVILLE (1953), cité par les mêmes auteurs, a montré que le module dynamique d'un béton qui était resté 300 jours dans un milieu humide était de 20 à 25% plus grand que celui d'un béton similaire maintenu lui, à l'air libre. De plus, il a conclu qu'un séjour partiel (150 jours) à l'air libre, suivi d'une même période dans un milieu humide permettrait d'obtenir une résistance toujours inférieure à celle d'un béton qui serait resté dans un milieu humide. JONES (1967) et DURAND (1975) ont immergé les éprouvettes dans de l'eau pendant 24 heures avant les essais, pour créer des conditions d'essai comparables.

La figure I-2 présente l'influence du conditionnement des éprouvettes sur les vitesses, en fonction du temps.

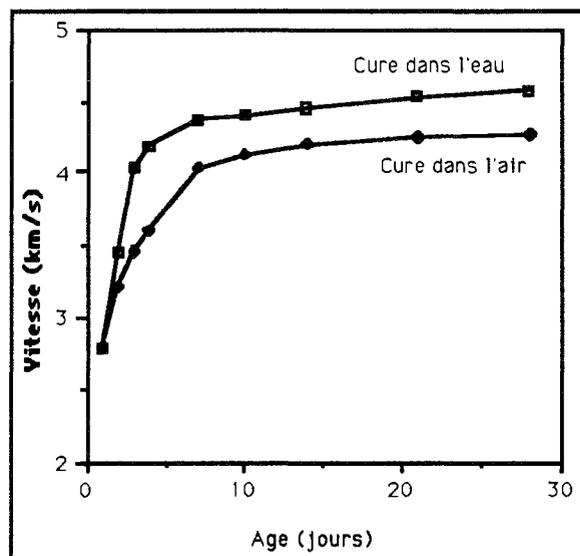


Figure I-2 - Influence du conditionnement et de l'âge de l'éprouvette sur la vitesse ultrasonique (D'après DURAND, 1975)

d) Influence des agrégats : Tout changement dans le rapport agrégats/ciment ou dans le type d'agrégats peut entraîner des variations de vitesse. Il s'agit d'un changement au niveau de l'arrangement entre les différents agrégats, qui provoque une modification de la porosité globale. Pour les éprouvettes de longueur supérieure à 400 mm, on peut négliger

l'influence de la distribution des granulats de diamètre maximal compris entre 20 et 30 mm (JONES et FACAOARU, 1969).

Le béton devient plus élastique quand il est fabriqué avec des agrégats concassés, des quantités de ciment plus importantes, ou un fort tassement. Son comportement serait plus plastique si on utilise des agrégats de rivière ou si le tassement est moins important (AVRAM et coll., 1981).

JONES et FĂCĂOARU (1971) ont proposé une relation à partir des vitesses obtenues pour le mortier et pour les agrégats, qui permet d'évaluer la vitesse de propagation pour un béton (V_b):

$$V_b = x * V_m + (1 - x) * \alpha * V_{ag}$$

où x = pourcentage volumique occupé par le mortier

V_m = vitesse obtenue sur le mortier

V_{ag} = vitesse obtenue sur les agrégats

α = facteur géométrique (granulométrie et forme) entre 0,75 et 0,80

Toutefois, dans la figure I-3, on remarque que le rapport: sable (S), gravier (G) et cailloux (C), n'a apparemment pas d'influence sur le changement de vitesse ultrasonique (DURAND, 1975).

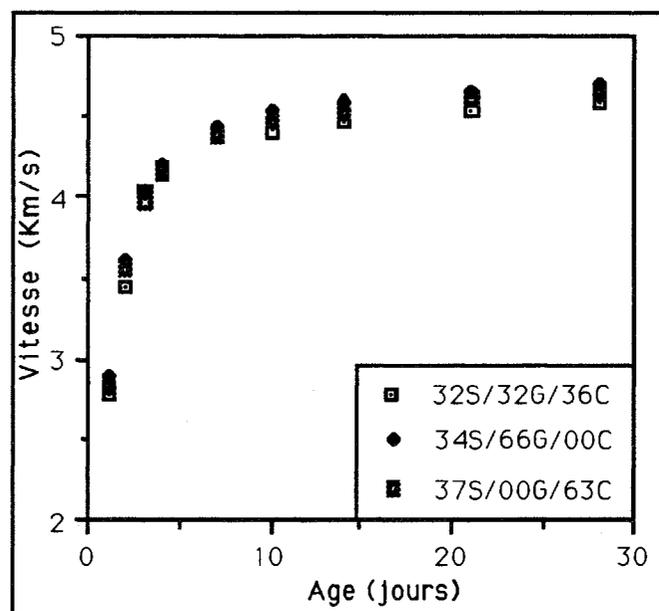


Figure I-3 - Influence du rapport sable/gravier/cailloux et du temps sur la vitesse ultrasonique (D'après DURAND, 1975)

e) Influence du type de ciment : Les différentes proportions entre les constituants du ciment (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) influent sur ses caractéristiques intrinsèques, telles que la vitesse de durcissement et la résistance finale. Les vitesses mesurées sur les éprouvettes réalisées à partir de ciments divers ne seront pas différentes, principalement lors des premiers jours. JONES et FACAOARU (1971) ont étudié les corrélations entre les vitesses obtenues avec les différents ciments et leurs résistances mécaniques correspondantes. Ils en ont conclu que le pourcentage de C_3A influençait les résultats. DURAND (1975) a montré que le ciment de la classe la plus élevée permettait d'obtenir un béton dont la vitesse de propagation était la plus grande. Toutefois, AVRAM et coll. (1981) ont démontré que le type de ciment n'influence pas de façon considérable le module dynamique du béton.

La figure I-4 représente l'influence du type de ciment sur les vitesses de propagation obtenues dans les bétons, au cours du temps.

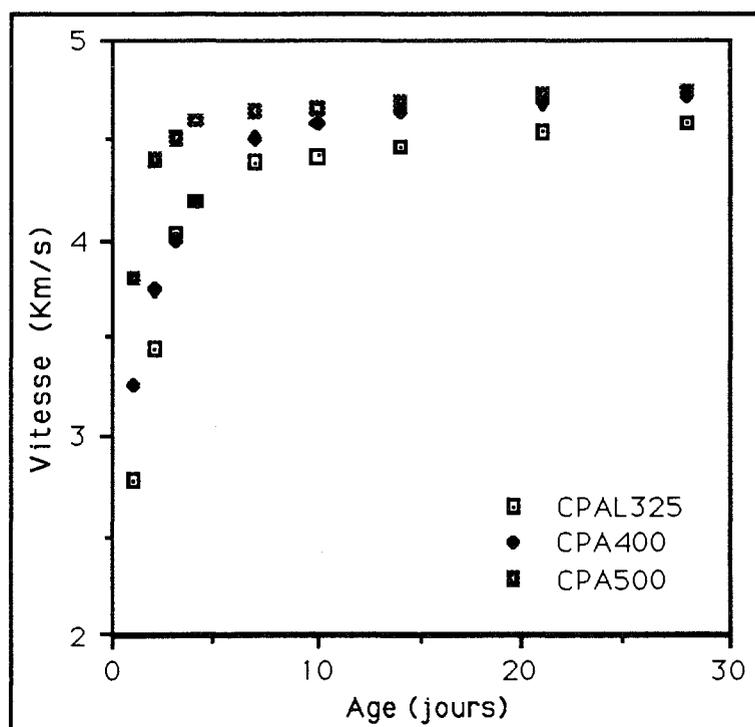


Figure I-4 - Influence du ciment sur la vitesse ultrasonique, au cours du temps (D'après DURAND, 1975)

f) Influence de la quantité de ciment : Une quantité plus importante de ciment permet généralement d'obtenir un béton plus résistant. La vitesse de propagation obtenue dépend du dosage, principalement durant la

période initiale de durcissement. Un béton plus riche en ciment induit de meilleurs contacts entre les agrégats, et permet ainsi une augmentation de la vitesse.

La figure I-5 représente l'influence de la teneur en ciment sur la vitesse de propagation sur le béton, au cours du temps.

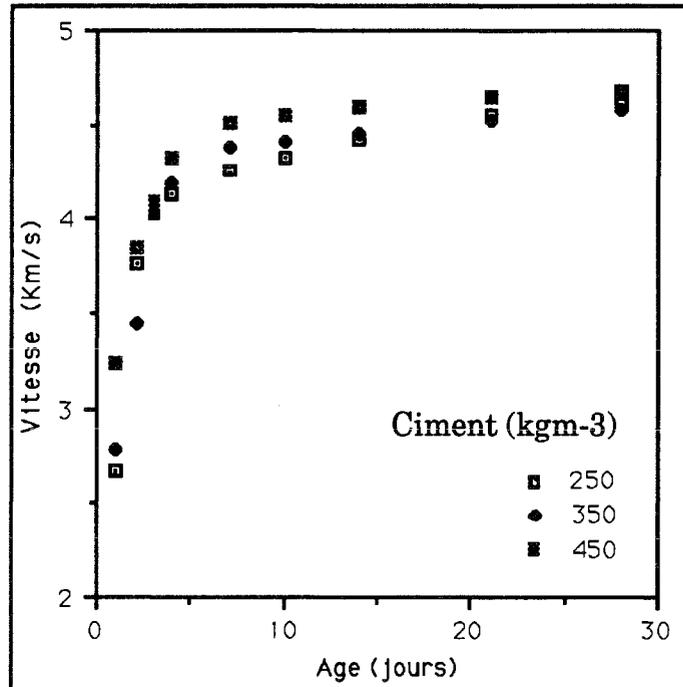


Figure I-5 - Influence de la teneur en ciment (kg/m^3) sur la vitesse ultrasonique, au cours du temps (D'après DURAND, 1975)

g) Influence de la teneur en humidité : Au fur et à mesure que le béton sèche, la vitesse de propagation diminue. Si, il est ensuite réhumidifié, la vitesse de propagation augmente. Cependant, il est difficile de bien séparer les deux phénomènes qui se produisent simultanément. La présence d'humidité peut favoriser les réactions d'hydratation et permettre la cicatrisation de la matrice. Pour analyser les effets dus aux changements d'humidité, on doit choisir des éprouvettes déjà stabilisées à l'air ambiant.

h) Influence d'autres variables : En plus des facteurs déjà cités, on peut tenir compte d'autres facteurs tels que: la dégradation du ciment, les dimensions des éprouvettes, la température au moment des essais, les adjuvants (accélérateurs, plastifiants, entraîneurs d'air, etc.), l'état de la surface des éprouvettes, les conditions opératoires, et l'hétérogénéité selon les axes considérés.

I-3 MODULE DYNAMIQUE DU BETON OBTENU PAR LA FREQUENCE DE RESONANCE

Le Centre Technique Forestier Tropical a développé un dispositif qui permet d'évaluer le module dynamique du bois d'après la fréquence de résonance. L'éprouvette en bois repose sur deux supports élastiques pour minimiser les pertes par vibration qui permettent la propagation de l'onde. On percute l'extrémité de l'éprouvette avec un marteau, et le signal sonore se propage, puis est capté par un microphone placé à l'autre extrémité. Une interface permet l'acquisition des données, qui sont ensuite traitées par un système informatique (figure I-6).

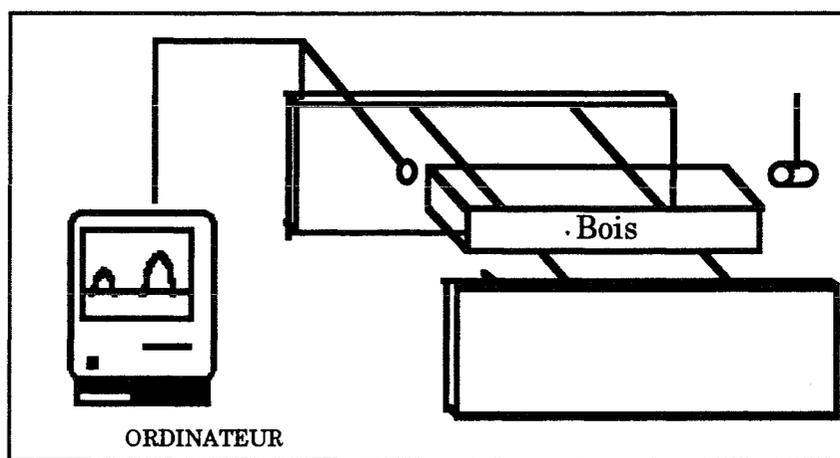


Figure I-6 - Schéma du dispositif utilisé au CTFT pour déterminer le module d'élasticité dynamique du bois

Les valeurs du module d'élasticité obtenues par fréquence de résonance sont bien corrélées avec celles obtenues avec la méthode de flexion statique. De même, il n'y a pas prédominance de la valeur de l'essai dynamique par rapport à celle de l'essai statique.

HAYNES (1993), dans ses recherches développées à l'INRA (Champenois) a utilisé la même technique pour évaluer les constantes élastiques du bois. Cependant, ses calculs ne prenaient en compte que la première partie de l'équation de la fréquence de résonance (f_f). La simplification permet d'obtenir le module dynamique (E_d) par la formule suivante :

$$E_d = \frac{0,946 * MV * f_i^2 l^4}{h^2}$$

D'autres techniques comme celles de l'atténuation de l'onde, ou du "stress wave", selon (ROSS et PELLERIN, 1988), permettent la prévision du comportement mécanique du bois. L'atténuation dépend de l'adhérence entre les différents constituants du bois, tandis que celle du "stress wave" dépend du stockage et de la dissipation de l'énergie.

ANNEXE II

UTILISATION DU BAMBOU COMME MATERIAU DE CONSTRUCTION

II.1 INTRODUCTION

Facilement usinable, le bambou est utilisé depuis longtemps au Brésil, pour la fabrication des clôtures de maisons, en combinaison avec de l'argile. Dans ce cas, le bambou n'a pas un rôle structurel. On l'utilise après division longitudinale des chaumes, ce qui permet la construction d'une "grille" de bambous, qui est ensuite recouverte d'argile. Cependant, ce type de construction n'est pas actuellement encouragé dans le pays, car ces "parois-composites" peuvent abriter un insecte qui est à l'origine de la maladie de Chagas, très dangereuse pour la santé de l'homme.

Le bambou étant un matériau biologique, on ne peut pas modifier considérablement sa structure élémentaire. Plusieurs chercheurs ont trouvé qu'une amélioration considérable du comportement du bambou en construction, est possible grâce à certaines techniques telles que: l'utilisation de chaumes secs (1-2 mois) et mûrs (2-3 ans), le traitement à l'eau froide, chaude ou en solution alcaline diluée, l'abattage en hiver, la disposition correcte dans une matrice, la pré-saturation des chaumes trop secs, l'enveloppement des chaumes de petits diamètres avec du barbelé, le pré-séchage dans la bamboueraie ou en ambiance protégée, l'utilisation d'un pourcentage optimal (3-4%) pour le renforcement des pièces composites soumises à la flexion statique, le recouvrement des chaumes par du bitume, suivi de l'application d'un sable grossier ("bambou à la milanaise").

Le but de l'association du bambou et du béton est d'utiliser les caractéristiques intéressantes de chacun de ces matériaux. Le béton apporte la résistance aux efforts d'écrasement et en même temps, assure la protection du bambou contre les attaques du milieu extérieur. Le bambou, de son côté, peut apporter au béton une résistance plus élevée aux efforts de traction et de flexion statique. Il semble que cette technique a été utilisée d'une manière plus intensive en Asie à l'occasion de la Deuxième Guerre Mondiale. Les premiers travaux sur ce sujet ont été publiés à la fin des

années 30 (DATTA, 1935, cité par LOPEZ (1974); SHIMADA, 1940; DE SIMONE, 1940; GLENN, 1950). Le travail de ce dernier auteur a été très important. Il a construit dans le Clemson Collège (Caroline du Sud, USA), des ouvrages de dimensions considérables, en renforçant le béton avec du bambou.

Une étude très complète sur le bambou et son utilisation en renforcement du béton a été réalisée par LOPEZ (1974). De plus, il faut ajouter les travaux développés dans différents pays par ONU (1972), LOPEZ (1978), SMITH et coll., (1979), GHAVAMI et HOMBECK (1981), BNH/DEPEA (1982), CEPED (1982), BERALDO (1987, 1990), LIESE (1987), GHAVAMI (1988, 1992) et SANYAL et coll. (1988). Dans la presque totalité des cas, le bambou a été utilisé directement sous forme de tige, de demi-tige ou de tiges tressées.

II.2 COMPOSITE BAMBOU-BETON

Les caractéristiques du composite bambou-béton dépendent de plusieurs paramètres : le type de ciment, les rapports entre les constituants du béton (ciment/sable/gravier/eau). De plus, la mise en oeuvre et la cure peuvent modifier les caractéristiques du composite.

Le béton forme une sorte de pellicule protectrice sur le bambou. Cependant, les deux matériaux ont des coefficients de variations dimensionnelles différents. Cette différence est encore plus importante lors d'un mauvais choix du bambou, en l'utilisant immature ou présentant une humidité excessive. Dans ce cas, les mouvements relatifs entre le bambou et le béton peuvent être très importants. La migration de l'eau de gâchage, au départ absorbée par le bambou, est ensuite reprise par le béton. Ce mouvement peut endommager la qualité du composite par l'apparition de chemins préférentiels pour la migration de l'eau.

Les problèmes de manque d'adhérence entre le bambou et le béton sont plus importants si on utilise des chaumes complets. En effet les espèces qui ne disposent pas de petites branches latérales, ne permettent pas un bon accrochage du béton. De plus, la couche extérieure est recouverte d'une sorte de cire protectrice qui, certes, empêche les interactions chimiques bambou-ciment, mais qui ne permet pas une adhérence satisfaisante du ciment. Cependant, l'élimination de cette couche

extérieure, par des processus mécaniques ou chimiques peut altérer significativement la résistance et la durabilité des chaumes.

L'utilisation de morceaux de chaumes préalablement découpés, semble être une alternative intéressante, de façon à bien profiter des chaumes d'espèces de plus grands diamètres. On peut également obtenir une meilleure adhérence avec le béton, car les morceaux de "diaphragme" obtenus lors du découpage, permettent une meilleure liaison avec le béton. Toutefois, lorsqu'on utilise de tels procédés, on expose les tissus internes aux actions chimiques du ciment. L'attaque du ciment provoque une dégradation des tissus du bambou, principalement au niveau des cellules de parenchyme (plus fréquentes dans les couches internes). L'extraction des sucres du bambou, par l'attaque du ciment, provoque l'apparition d'une zone de faiblesse. Les composites restent donc plus vulnérables et présentent une réduction assez importante de leur qualité. Toutefois, on remarque que les différents auteurs ne sont pas d'accord sur le comportement chimique du bambou vis-à-vis du ciment (DATTA, 1935, cité par LOPEZ, 1974; SHIMADA, 1940).

Le renforcement des poutres en béton avec du bambou n'empêche pas l'apparition de fissures quand les charges sont supérieures à celles prévues pour une pièce identique non renforcée. Il y a une augmentation considérable de la charge maximale (2 à 3 fois) quand nous utilisons un pourcentage optimal de bambou en renforcement (GLENN, 1950). L'utilisation d'un renforcement du béton par le bambou permet l'obtention d'une plus grande sécurité en cas de rupture des pièces par retardement de l'effondrement. La présence des fissures longitudinales et transversales, dues aux différents mouvements initiaux entre le bambou et le ciment, peuvent être minimisées si on utilise un ciment à haute résistance initiale ou si on procède au pré-mouillage du bambou.

Le placement correct des chaumes dans les pièces de bambou-béton est très important. On doit adopter une distance convenable entre les chaumes dans les sens longitudinal et transversal. Le placement de la "grille" de bambou au dessous de la ligne neutre de la pièce, et son assemblage correct, permettent un renforcement efficace. Les plaques en béton renforcées avec du bambou ne doivent pas être soumises à des charges centrales car les fissures y apparaissent plus facilement.

Apparemment, le renforcement du béton par du bambou est conseillé pour la fabrication de dalles et de murs, principalement par sa simplicité de

mise en oeuvre. L'armature de bambou dans le béton permet une importante réduction des coûts et du poids. La tendance du béton à se fissurer est réduite car l'armature en bambou peut absorber une partie des déformations dues à la dilatation du béton. On peut utiliser le béton renforcé avec du bambou pour la fabrication de pièces non chargées dans une structure, ou pour la fabrication de bancs, murs, poteaux, vases, couvercles, etc.

II.3 COMPOSITES BAMBOU-AUTRES MATERIAUX

Le bambou peut être associé à d'autres matériaux. Parmi les produits étudiés, on peut citer :

- la toiture bambou-uréthane (STUBBLEFIELD et coll., 1973)
- le composite bambou- araldite (JINDAL, 1986);
- le bambou reconstitué utilisé à des fins structurelles (SHUKLA et PRASAD, 1988);
- les panneaux de particules de bambou acétylées (ROWELL et NORIMOTO, 1988);
- le bois lamellé-collé avec une résine obtenu à partir de liqueur noire extraite du bambou (SINGH et JOSHI, 1988);
- le composite bambou-époxy (SHIN et coll., 1989);
- les panneaux de particules de bambou à résine phénolique (XUHE et KELIN, 1990);
- les plaques préfabriquées associant des briques céramiques et du bambou (BERALDO, 1990).

De part ses bonnes propriétés mécaniques et sa grande disponibilité, le bambou est une importante ressource naturelle pour la construction. Si on l'utilise dans de bonnes conditions, c'est-à-dire, si l'abattage est effectué lorsqu'il a atteint sa maturité et si on le stocke à l'abri de l'attaque des microorganismes, il peut être associé à différents matériaux de construction, notamment sous forme d'armature en renforcement du béton.

Les propriétés physico-mécaniques d'un composite particules de bambou-ciment sont optimisées par les différents types de traitements et les rapports entre les constituants utilisés. Les composites ainsi obtenus sont très intéressants pour les ouvrages de maintenance et de rénovation, pour les structures secondaires, pour la fabrication de planchers de bâtiments agricoles. Il s'agit du "béton paysan".

ANNEXES III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

ANNEXE III.1-Phyllostachys sp (B158-B14)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	Δ(°C)	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
B158	Référence	1000	1500	900	0	0	21,0	11,5	915	4,5	-	6,1	3,3
B159	Lavé-1,0h-80°C-NaOH(0,1N)	940	1500	900	0	0	14,0	12,5	905	3,7	-	3,5	2,0
B160	Lavé-1,0h-80°C-H2SO4(0,1N)	1010	1500	900	0	0	13,0	16,5	940	4,5	4,0	3,2	2,9
B161	Lavé-1,0h-80°C + sable	700	1500	700	1000	0	17,0	9,0	1100	>5,0	2,2	1,4	1,2
B162	Lavé-1,0h-80°C	1000	1500	900	0	0	11,5	20,0	1050	>5,0	1,9	4,1	1,7
B163	Lavé-1,0h-80°C+paraffine+sable	750	1500	700	500	250	12,5	11,5	925	>5,0	3,8	2,5	2,7
B01	Référence	640	1320	860	0	0	21,5	11,0	800	3,5	6,5	4,4	4,2
B02	Lavé-24,0h-20°C	560	1320	770	0	0	11,5	15,5	950	2,7	3,5	2,0	1,6
B03	Attaqué par du ciment	850	1320	800	0	0	16,5	11,5	790	3,5	4,6	2,6	2,2
B04	Traité-carbure de calcium	400	500	450	0	0	11,0	6,5	470	0,9	7,0	8,4	6,3
B05	Référence- 80 x 80 mm	500	650	520	0	0	12,0	6,5	660	2,0	5,0	5,9	4,3
B06	Référence	600	700	600	0	0	11,5	8,0	710	1,5	7,8	8,0	5,1
B07	<i>Phyllostachys nigra</i>	730	720	750	0	0	10,0	6,5	630	<0,5	-	7,0	5,8
B08	Attaqué par du ciment	780	600	490	0	0	15,0	7,5	820	2,1	2,7	3,2	2,0
B09	Attaqué par du ciment	780	600	490	0	0	14,0	7,0	740	1,6	4,3	6,4	3,5
B10	Traité avec du ciment (75 g/l)	650	700	600	0	0	15,0	9,0	700	1,9	5,0	5,0	3,7
B11	Référence	600	800	600	0	0	11,5	8,5	740	2,5	6,9	7,5	4,0
B12	Référence	590	900	640	0	0	11,0	8,5	870	4,2	5,2	5,3	2,9
B13	Lavé-1,0h-80°C	600	800	600	0	0	7,0	11,5	770	2,2	5,2	5,8	4,6
B14	Bambou(350g)+sapin(170g)	520	800	600	0	0	12,0	12,0	870	2,3	4,7	5,4	3,6

ANNEXE III.2-Phyllostachys viridis (C01-C29)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	Δ(°C)	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
C01	Référence humide	750	700	490	0	0	12,5	4,5	620	0,3	6,5	-	-
C02	Référence sec	750	700	620	0	0	5,5	8,0	1045	0,3	-	-	-
C03	Référence humide	900	700	400	0	0	15,0	7,5	680	0,4	16,8	12,5	9,7
C04	Référence sec	660	700	620	0	0	6,5	7,5	590	0,2	14,0	10,4	6,1
C05	Référence sec	600	750	560	0	0	14,0	7,5	690	0,2	10,3	13,0	8,5
C06	Référence sec	580	800	620	0	0	13,5	8,5	730	0,3	-	11,8	5,8
C07	Fermenté-lavé-1,0h-80°C	600	880	770	0	0	12,5	11,0	850	3,8	6,7	5,4	3,5
C08	Fermenté-lavé-1,0h-80°C	600	880	840	0	0	12,5	14,0	780	3,7	7,3	5,4	4,0
C09	Récupéré (ex C02)	740	880	660	0	0	14,5	5,0	900	4,7	5,0	4,2	3,3
C10	Fermenté-sec à 90°C	600	880	680	0	0	8,5	7,5	790	0,3	20,4	9,1	10,9
C11	Sec à 90°C	600	880	600	0	0	12,0	6,5	730	0,3	12,7	9,7	5,9
C12	Sec à 90°C ==> desintégré	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C13	Lavé à l'eau-20°C	600	880	620	0	0	11,0	13,5	900	4,6	7,0	4,4	2,4
C14	Lavé avec de la lessive de soude	600	880	780	0	0	12,0	12,0	860	3,8	5,7	4,8	4,2
C15	Récupéré (ex C12)	590	850	620	0	0	14,0	5,0	780	1,2	-	11,9	13,6
C16	Lavé-1,0h-80°C-sec à 90°C	600	880	720	0	0	11,0	5,5	860	5,0	5,5	4,5	1,7
C17	Fermenté-lavé avec de la lessive	600	880	660	0	0	14,5	8,5	790	3,3	10,5	5,9	4,3
C18	Lavé-1,0h-80°C-NaOH(1%)	560	880	880	0	0	16,5	11,5	870	2,9	3,5	2,4	2,8
C19	Idem + CaCl2 (3%)	560	880	880	0	26	16,5	9,5	880	3,3	5,8	4,4	3,1
C20	Sec à 80°C	600	880	590	0	0	13,5	7,5	820	<0,5	-	-	-
C21	Sec à 80°C	600	880	590	0	0	13,5	8,0	770	-	-	-	-
C22	Fermenté-lavé-1,0h-80°C	600	880	780	0	0	13,5	9,5	730	2,1	2,1	5,2	4,1
C23	Lavé avec de la chaux (10g/l)	600	880	720	0	0	20,0	9,0	-	3,7	3,7	6,2	3,3
C24	Fins (dimension <0,8 mm)	900	1300	800	0	0	-	-	-	-	-	-	-
C25	Gros (dimension > 2mm)	900	1300	750	0	0	-	-	-	-	-	-	-
C26	Prémouillé-80 g d'eau	600	900	500	0	0	5,0	11,0	780	0,4	0,4	29,2	-
C27	Récupéré	860	900	800	0	0	19,5	12,0	880	3,4	3,4	3,5	3,0
C28	Prémouillé-570g d'eau(0,5h)	600	1000	720	0	0	4,0	8,5	860	0,3	0,3	17,0	7,5
C29	Lavé-1,0h-60°C	600	1000	700	0	0	9,0	6,5	890	2,4	2,4	4,0	4,2

ANNEXE III.3-Phyllostachys viridis (C30-C58)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	$\Delta(^{\circ}\text{C})$	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
C30	Lavé-24,0h-20°C	600	1000	700	0	0	17,0	10,5	930	4,1	7,2	5,1	3,8
C31	Lavé-1,0h-80°C	600	1000	650	0	0	3,5	9,0	870	2,3	5,9	5,6	4,3
C32	Lavé-2,0h-80°C	600	1000	650	0	0	11,0	15,0	900	5,1	7,1	5,2	2,7
C33	Lavé-0,5h-80°C	600	1000	650	0	0	3,0	11,0	830	2,3	8,1	6,0	4,4
C34	Lavé-1,5h-80°C	600	1000	650	0	0	12,0	12,5	850	3,9	7,7	6,3	2,9
C35	Lavé-1,0h-20°C	550	915	595	0	0	2,0	10,5	780	0,6	5,3	11,6	7,5
C36	Lavé-2,0h-60°C	560	915	600	0	0	1,0	9,5	840	4,2	6,8	6,1	4,2
C37	Sec à l'air	570	920	600	0	0	2,5	12,0	750	0,3	13,4	20,9	12,1
C38	Sec à l'air	600	920	500	0	0	2,0	11,0	770	0,6	15,9	24,0	9,9
C39	Lavé-1,0h-60°C-NaOH	590	980	700	0	0	14,5	7,0	860	2,3	9,9	7,5	3,2
C40	Lavé-1,0h-80°C-NaOH	560	920	600	0	0	11,0	6,5	860	0,8	10,3	10,5	4,2
C41	Récupéré	750	1120	550	0	0	15,0	17,5	1200	6,8	2,8	2,1	0,6
C42	Récupéré	750	1120	550	0	0	14,5	17,0	1200	7,8	2,9	2,2	0,8
C43	Lavé-72,0h-20°C	570	940	650	0	0	9,5	14,0	860	3,9	3,8	4,2	3,2
C44	Lavé-1,0h-80°C-NaOH	530	850	600	0	0	0,5	6,5	760	0,8	4,8	8,0	5,4
C45	Récupéré	650	700	500	0	0	21,0	5,0	860	3,1	4,7	4,2	1,7
C46	Préattaqué par du ciment (15 mn)	610	880	700	0	0	15,5	4,0	-	-	-	-	-
C47	Préattaqué par du ciment (30 mn)	600	880	660	0	0	4,5	5,0	-	-	-	-	-
C48	Préattaqué par du ciment (60 mn)	600	880	600	0	0	8,0	5,5	-	-	-	-	-
C49	Récupéré	1400	1045	940	0	0	0,5	5,0	880	3,5	4,7	4,3	3,3
C50	Bambou(510g)+Bagasse(118g)	630	1400	1000	0	0	23,0	6,0	900	2,2	5,3	3,0	2,8
C51	Préattaqué -ciment (60 mn-46°C)	610	880	600	0	0	1,5	4,0	-	-	-	-	-
C52	Préattaqué par du ciment (2h)	610	880	600	0	0	17,5	6,0	870	2,7	4,7	3,7	3,1
C53	Récupéré (ex C51)	770	880	550	0	0	12,5	9,5	980	4,4	3,3	3,1	2,7
C54	Lavé-1,0h-80°C	610	880	660	0	0	12,5	12,0	860	4,9	5,7	3,6	3,4
C55	Lavé-1,0h-80°C+C400(1/2)	610	880	600	440	0	12,0	10,5	1010	7,4	3,1	2,7	2,1
C56	Lavé-1,0h-80°C+ciment(200g/l)	700	880	500	100	0	14,0	10,5	880	5,6	6,3	5,1	3,3
C57	Référence + ciment pulvérisé	700	880	500	100	0	6,0	6,5	-	-	-	-	-
C58	Bitume (6,5%)	660	880	500	0	40	0,5	9,5	790	1,2	6,4	7,8	4,9

ANNEXE III.4-Phyllostachys viridis (C59-C87)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	Δ(°C)	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
C59	Bitume (13%)	600	880	500	0	80	3,5	9,5	850	1,5	8,3	7,5	3,7
C60	Récupéré (ex C57)	1590	880	800	0	0	9,0	5,0	1290	>7,8	4,6	2,9	1,6
C61	Lavé-1,0h-80°C+C400(1/4)	660	880	600	220	0	6,5	8,5	870	2,1	7,3	8,4	5,4
C62	Lavé-1,0h-80°C+C400(1/8)	610	880	620	110	0	3,0	8,0	870	2,1	5,7	8,1	4,8
C63	Lavé-1,0h-80°C+CaCO3(1/10)	660	880	600	88	0	4,5	7,5	880	1,8	6,3	7,7	4,4
C64	Sec+ciment pulv(400g/l)	660	880	600	200	0	13,0	10,0	850	3,3	6,4	5,5	4,8
C65	Lavé-1,0h-80°C+LA35(1/2)	600	880	600	440	0	5,5	7,0	1000	1,6	5,8	6,3	4,0
C66	Lavé-1,0h-80°C+LA35(3/3)	600	880	700	880	0	4,5	6,5	1140	3,2	4,9	3,9	2,0
C67	Lavé-2,0h-80°C	600	880	600	0	0	3,5	9,5	900	4,1	8,4	7,6	4,9
C68	Lavé-2,0h-80°C-cure humide	600	880	600	0	0	7,0	8,0	880	4,5	6,2	6,8	5,6
C69	Lavé-2,0h-80°C+ciment(200g/l)	600	880	600	10	0	4,5	7,5	950	5,6	5,6	4,4	3,7
C70	Lavé-2,0h-80°C+ciment(400g/l)	600	880	600	200	0	14,5	8,0	950	5,7	5,7	4,4	3,5
C71	Lavé-2,0h-80°C+ciment(600g/l)	600	880	600	300	0	19,0	9,5	1000	10,2	4,8	3,5	2,6
C72	Lavé-2,0h-80°C+ciment(800g/l)	600	880	600	400	0	18,5	12,0	1060	12,5	4,8	3,5	2,6
C73	Lavé-2,0h-80°C	600	880	600	0	0	14,5	9,5	850	3,9	7,2	5,4	4,1
C74	Lavé+ciment-3X(200g/l)	600	880	600	300	0	14,5	14,0	1090	12,5	4,7	3,2	2,5
C75	Lavé+ciment (400g/l)+C400(1/2)	600	880	600	400	200	15,0	12,0	1150	12,0	3,9	1,8	1,9
C76	Type I (dimension >5,0 mm)	600	880	600	0	0	8,5	7,5	840	2,0	9,7	8,2	6,1
C77	Type II (3,15<dim<5,0 mm)	600	880	600	0	0	14,5	10,5	830	3,8	4,8	6,1	5,0
C78	Type III (2,0<dim<3,15 mm)	600	880	600	0	0	14,0	10,0	800	3,6	7,1	7,1	4,5
C79	Type IV (0,8<dim<2,0 mm)	600	880	600	0	0	14,5	9,0	770	3,1	7,9	7,3	5,3
C80	Type V (dim<0,8 mm)	600	880	600	0	0	4,0	8,0	790	2,3	9,7	8,4	5,2
C81	Lavé-12,0h-20°C	550	880	600	0	0	9,5	16,0	890	4,6	6,3	4,3	2,9
C82	Lavé-2,0h-80°C+ huile de lin (10%)	600	880	600	0	60	15,0	11,5	890	2,7	4,4	3,5	2,4
C83	Référence lavé (0,5<dim<5 mm)	600	880	600	0	0	16,0	10,5	860	4,4	8,9	7,3	4,3
C84	Bitume (10%)	600	880	600	0	60	15,0	11,0	900	3,4	5,6	4,8	2,6
C85	Bitume (10%) + LA35(1/3)	600	880	600	300	60	15,0	11,0	1010	3,5	5,0	3,6	1,9
C86	Lavé-référence 100 x 100 mm	960	1400	1000	0	0	15,5	16,0	880	7,1	7,2	6,1	4,8
C87	Lavé-24,0h-20°C	600	880	600	0	0	8,5	17,0	870	4,3	6,2	5,9	4,3

ANNEXE III.5-Phyllostachys viridis (C88-C110)-Pin marit(M11)-Hêtre(H11)

Ep	Traltement	B	C	E	S	A	t(h)	Δ(°C)	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
C88	Ciment- 2X(400g/l)	1000	1400	1200	200	0	15,0	14,5	950	4,7	6,2	4,6	3,8
C89	Idem + sable Fontainebleau (3/3)	1230	1400	1400	1400	0	15,0	11,0	1210	9,6	3,3	2,0	1,8
C90	Référence + SF (3/3)	1000	1400	1200	1400	0	14,0	11,5	1110	7,3	2,6	2,2	1,8
C91	Référence + SF (3/3)	790	1100	900	1100	0	15,0	12,0	1130	6,6	2,7	2,1	1,5
C92	Référence + SF (3/2)	790	880	900	1320	0	14,0	10,0	1090	6,1	2,6	2,3	1,8
C93	Réf + LA35(3/3)+FeCl3(1,2%)	500	710	600	710	8	10,0	13,0	1180	9,8	3,1	2,6	1,9
C94	Bitume (10%)	800	1100	900	0	60	11,0	16,0	860	4,3	5,3	4,1	3,1
C95	Bitume (10%)+C400 (3/3)	800	1100	1200	1100	70	10,0	15,5	1170	8,2	2,9	1,6	1,3
C96	Bitume (20%)	800	1100	900	0	110	10,5	17,5	860	4,6	4,3	3,0	2,6
C97	Bitume (20%)+C400 (3/3)	800	1100	1100	1100	140	9,0	17,0	1190	8,2	2,8	1,4	0,9
C98	Bitume (10%)+C400 (3/3)	800	1100	1100	1100	100	9,0	16,5	1200	7,6	2,6	1,3	0,8
C99	Bitume (10%)+C400 (3/2)	800	880	1000	1320	100	8,0	14,5	1140	7,0	2,6	1,7	1,4
C100	Bit(10%)+C400(3/3)+FeCl3(1,5%)	800	1100	1000	1100	15	8,0	17,0	1170	7,9	2,8	1,7	1,4
C101	Ciment pulvérisé (400g/l)	800	960	900	0	200	23,5	8,0	770	3,5	7,2	5,5	4,3
C102	Ca(OH)2-(500g/l)	800	1160	1000	0	500	18,0	10,5	885	4,8	5,4	3,8	2,1
C103	Non lavé + CaCl2 (3%)	950	1400	1000	0	42	3,5	14,0	770	0,5	7,5	13,4	20,7
C104	Bitume B3(10%)	910	1100	1100	0	90	13,0	13,5	810	2,2	4,1	2,4	2,6
C105	Bitume B3(10%) + C400 (3/3)	820	1100	1100	1100	80	12,5	15,0	1130	4,8	2,2	1,0	1,2
C106	Lavé-2,0h-80°C + CaCl2 (3%)	90	1200	1000	0	36	11,0	19,5	750	3,8	7,6	7,7	5,2
C107	Lavé + CaCl2 (3%)+C400(3/3)	900	1200	1200	1200	36	9,5	9,5	1150	6,5	3,1	2,2	1,8
C108	B3(10%)+C400(3/3)+CO2 (creuse)	520	770	720	770	60	-	-	1170	7,0	1,7	1,4	1,5
C109	B3(10%)+LA35(3/3)+CO2 (creuse)	520	770	510	770	60	-	-	1150	5,6	2,9	1,5	1,1
C110	B3(10%)+LA35(3/3)+CO2	820	1200	900	1200	80	-	-	1215	6,0	2,0	1,2	1,1
M11	P. mar- B3(10%)+LA35(3/3)+CO2	820	1200	900	1200	80	-	-	1050	3,6	1,4	2,0	1,6
H11	Hêtre- B3(10%)+LA35(3/3)+CO2	820	1200	800	1200	80	-	-	1100	3,2	2,1	1,8	1,5

ANNEXE III.6-Hêtre(H01-H10)-P. maritime (M01-M10)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	$\Delta(^{\circ}\text{C})$	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
H01	Référence-Hêtre	800	1120	1000	0	0	-	-	725	1,5	15,3	16,1	12,8
H02	Référence-Hêtre	880	1260	1100	0	0	6,0	10,0	750	1,2	14,2	14,3	11,6
H03	Référence-Hêtre	840	1200	1050	0	0	7,0	12,5	740	1,4	16,6	14,9	12,0
H04	Lavé-2,0h-80°C	700	1200	1000	0	0	9,0	16,0	780	2,2	8,2	8,4	6,3
H05	Référence + CaCl ₂ (3%)	840	1200	1050	0	36	10,5	16,0	770	2,8	11,6	9,8	7,6
H06	Lavé-2,0h-80°C	840	1200	1000	0	0	11,0	16,0	750	1,6	8,2	9,5	7,2
H07	Lavé-2,0h-80°C	840	1200	1000	0	0	10,5	16,0	745	1,5	7,4	9,0	6,7
H08	Lavé-2,0h-80°C + CaCl ₂ (3%)	840	1320	1210	0	40	-	-	830	3,2	7,7	7,0	4,6
H09	Lavé-2,0h-80°C+B3(10%)	840	1200	1100	0	90	12,5	13,5	800	1,6	5,3	3,6	2,5
H10	Lavé + B3(10%)+C400(3/3)	810	1200	1100	1200	90	9,0	20,5	1215	5,1	2,1	0,9	0,8
M01	Référence-Pin maritime	900	1400	1200	0	0	3,0	6,5	705	1,4	6,8	8,7	6,0
M02	Référence-Pin maritime	800	1250	1100	0	0	4,5	6,0	715	1,4	8,1	9,5	6,8
M03	Référence + CaCl ₂ (3%)	750	1170	1000	0	35	13,0	13,0	735	3,0	10,8	8,0	5,2
M04	Référence + CaCl ₂ (3%)	750	1170	1000	0	35	13,0	13,5	730	2,7	8,8	9,3	5,4
M05	Lavé-2,0h-80°C	750	1170	1000	0	0	12,0	14,0	670	2,3	5,6	6,6	4,4
M06	Lavé-2,0h-80°C	750	1170	1210	0	0	15,0	11,0	710	3,0	5,2	5,4	4,0
M07	Lavé-2,0h-80°C + CaCl ₂ (3%)	750	1170	1200	0	35	10,5	20,0	730	3,6	7,2	5,8	4,3
M08	Lavé-2,0h-80°C + CaCl ₂ (3%)	750	1170	1200	0	35	10,5	20,0	730	3,6	6,7	5,9	3,7
M09	Lavé-2,0h-80°C+B3(10%)	750	1200	1100	0	70	14,5	11,5	790	2,0	3,3	3,0	2,5
M10	Lavé + B3(10%)+C400(3/3)	750	1200	1200	1200	70	13,5	14,0	1160	4,9	1,9	1,0	0,8

ANNEXE III.7- sapin (227-255)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	$\Delta(^{\circ}\text{C})$	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
227	Stéarate-manuel	640	1320	1500	0	128	14,5	16,5	830	>5,0	3,3	3,0	2,0
228	Stéarate-malaxeur	640	1320	1500	0	128	13,5	20,0	850	>5,0	4,3	1,9	1,2
229	PEG(20%)- dilué	600	1320	1100	0	130	22,0	11,5	820	4,2	3,0	2,6	2,3
230	PEG(20%)- non dilué	600	1320	1100	0	130	22,0	12,5	850	4,2	1,7	2,7	1,4
232	Polysorb (10%)	660	1320	1200	0	66	0,0	5,5	690	0,6	7,0	12,0	9,0
233	Polysorb (20%)	660	1320	1200	0	132	4,0	4,5	770	0,9	7,2	11,0	8,9
234	Polysorb (5%)	660	1320	1200	0	33	0,0	4,5	670	0,4	3,9	11,3	6,0
235	Spin-référence	660	1320	1200	0	0	20,5	14,0	770	3,8	5,3	4,6	3,3
236	Sapin + mica	660	1320	1300	0	107	19,0	16,0	760	3,0	7,0	5,4	3,8
237	Tackidex (5%)	660	1320	1200	0	33	0,5	5,0	790	0,3	7,1	10,8	7,1
238	Tackidex (20%)	660	1320	1200	0	132	1,0	2,0	-	0,2	-	-	-
239	Tackidex (10%)	660	1320	1200	0	66	0,5	5,0	770	0,7	6,0	11,6	9,1
240	Ciment (200g/l)	660	1320	1000	0	100	26,5	9,0	710	2,3	5,0	3,8	3,6
241	PEG400(10%)+C400(1/3)	660	1320	1200	440	50	20,5	13,0	950	4,1	3,3	2,6	2,4
242	PEG400(10%)+C400(2/3)	660	1320	1200	880	76	20,0	13,5	1070	>5,0	2,0	1,9	1,8
243	PEG400(10%)+C400(3/3)	660	1320	1200	1320	72	20,0	12,5	1180	>5,0	1,2	1,0	1,0
244	Tackidex G160 (5%)	700	1320	1100	0	20	0,0	4,0	700	0,3	6,9	14,4	10,9
245	Tackidex G160 (10%)	700	1320	1100	0	50	0,5	3,0	730	0,3	3,3	12,1	11,2
246	Tackidex G160 (20%)	700	1320	1200	0	140	10,5	3,0	820	0,2	7,6	-	-
247	Bitume (5%)	700	1320	1200	0	30	18,5	14,0	780	3,7	5,3	4,9	3,8
248	Bitume (10%)	700	1320	1200	0	60	18,5	13,0	790	3,1	3,2	3,8	2,9
249	Bitume (20%)	700	1320	1100	0	140	18,5	16,0	870	2,5	3,7	3,0	2,7
250	Ciment (400g/l)	660	1320	1200	0	200	16,0	17,5	840	4,5	5,4	4,7	3,2
251	Bitume (20%) + C400(1/3)	700	1320	1100	440	120	16,0	17,5	910	2,8	3,1	2,2	1,5
252	Bitume (20%) + C400(2/3)	700	1320	1100	880	120	15,5	17,0	990	2,7	2,8	1,6	1,2
253	Bitume (20%) + C400(3/3)	700	1320	1300	1320	120	14,0	14,5	1090	4,3	1,1	0,8	0,8
254	Référence + C400(1/3)	660	1320	1300	440	0	14,5	15,0	890	4,0	5,3	4,1	3,0
255	Référence + C400(2/3)	660	1320	1300	880	0	14,5	15,0	960	4,2	3,5	2,5	2,1

ANNEXE III.8- sapin (256-284)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	Δ(°C)	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
256	Référence + LA35(1/3)	660	1320	1300	440	0	8,5	17,0	890	3,7	4,5	3,4	3,2
257	Référence + LA35(3/3)	660	1320	1400	1320	0	19,0	11,0	1140	8,5	2,9	1,6	1,9
258	Référence + LA35(2/3)	660	1320	1350	880	0	18,0	14,5	1040	8,5	2,3	2,4	2,2
259	Référence+LA35(2/3)-cure humide	660	1320	1350	880	0	18,5	13,5	1060	9,2	2,1	1,9	1,8
260	Calcaire (2/3)	660	1320	1350	880	0	14,5	15,5	1000	4,4	3,8	3,1	2,3
261	C400(3/3)	660	1320	1400	1320	0	19,0	15,0	1200	>10,0	2,8	1,6	1,2
262	Ciment (800g/l)	660	1320	1100	400	0	17,0	15,0	900	7,0	5,2	3,6	3,8
263	LA35(3/2)	660	1120	1400	1320	0	21,5	11,5	1080	7,8	2,6	2,2	1,6
264	Bitume B2(10%)	660	1320	1200	0	70	18,5	15,5	900	3,4	4,6	3,7	2,4
265	Bitume B2(10%)+LA35(2/3)	660	1320	1300	880	70	19,0	13,5	1120	4,9	2,2	1,6	1,3
266	Bitume B2(5%)	680	1320	1200	0	35	18,5	15,0	790	2,9	3,5	3,3	2,9
267	Bitume B2(10%)+LA35(9%)	715	1320	1200	115	70	18,5	14,5	840	2,5	4,3	3,3	2,4
268	Bitume B2(10%)+LA35(18%)	650	1320	1200	330	70	17,0	15,5	890	3,0	2,9	3,0	1,8
269	Bitume B2(10%)+LA35(36%)	700	1320	1300	660	90	17,0	15,0	1030	3,9	2,8	2,6	1,8
270	Ciment- 2X(280g/l)	700	1320	1200	160	0	13,5	17,0	870	4,6	6,6	5,2	4,0
271	Bitume B2(10%)+C400(2/3)	660	1320	1400	880	90	14,0	16,0	1065	7,8	3,1	1,6	1,5
272	Bitume B1(10%)+C400(10%) après	660	1320	1200	132	70	17,0	14,5	770	2,8	3,9	3,0	2,4
273	Bitume B1(10%)+LA35(3/3)	680	1320	1400	1320	70	19,0	12,0	1120	6,1	2,1	1,4	1,1
274	Bitume B1(10%)+C400(3/3)	680	1320	1400	1320	70	13,0	15,0	1095	5,6	2,3	1,9	1,1
275	B1(10%)+LA35(3/3)+calc f.(10%)	680	1188+132	1400	1320	70	18,0	12,5	1160	5,3	1,5	1,4	1,2
276	B1(10%)+LA35(3/3)+calc g.(10%)	680	1188+132	1400	1320	70	18,0	12,0	1100	5,4	0,4	1,3	1,2
277	B1(10%)+LA35(3/3)+calc f.(20%)	680	1056+264	1400	1320	70	17,5	10,5	1160	5,3	2,1	1,3	1,1
278	B1(10%)+LA35(3/3)+calc g.(20%)	680	1056+264	1400	1320	70	19,0	9,0	1140	4,7	1,6	1,4	1,1
279	Bitume B2(20%)	700	1320	1200	0	140	18,0	14,0	810	2,7	4,3	2,7	2,3
280	B1(10%)+LA35(3/3)+anhyd(20%)	750	1320	1400	1320	80	14,0	12,0	1150	4,1	2,4	2,2	1,8
281	Bitume B2 (10%)	700	1320	1200	0	60	14,0	16,0	770	3,1	3,0	3,3	2,2
282	Bitume B1 (20%)	700	1320	1200	0	130	15,0	16,0	820	3,5	3,1	2,9	2,1
283	Bitume B1(10%)+C400(3/3)	700	1320	1400	1320	60	11,0	13,0	1040	5,0	2,1	1,8	1,2
284	Bitume B1(10%)	700	1320	1200	0	60	15,0	14,0	800	3,7	2,2	3,0	2,1

ANNEXE III.9-sapin (285-313)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	Δ(°C)	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
285	Bitume B1(20%)+C400(3/3)	700	1320	1400	1320	190	10,0	14,0	1080	6,2	0,9	1,3	1,0
286	Bitume B1(10%)+C400(3/3)	700	1320	1400	1320	80	11,0	14,0	1050	5,6	1,8	1,4	0,9
287	Bitume B3(10%)	700	1320	1200	0	90	15,0	16,5	840	4,0	2,2	2,9	2,3
288	Bitume B3(20%)	700	1320	1200	0	140	13,5	17,5	840	3,8	2,4	2,3	2,1
289	B3(10%)+C400(3/3)	700	1320	1400	1320	90	11,5	16,0	1130	7,1	1,1	1,0	0,9
290	Référence-B3(10%)+C400(3/3)	690	1200	1200	1200	70	13,5	14,5	1140	5,5	2,3	1,0	0,8
291	CERIB-B3(10%)+C400(3/3)	690	1200	1200	1200	70	14,0	14,5	1140	6,7	1,7	0,9	0,8
292	B3(10%)+C400(5/3)	690	900	1200	1500	70	12,5	11,5	1100	6,4	1,8	1,6	1,5
293	B3(10%)+C400(9/3)	690	600	1200	1800	70	13,0	7,0	1050	5,0	1,8	1,7	1,0
294	B3(10%)+C400(4/3)+calc g.(1/3)	690	900+300	1200	1200	70	12,5	11,5	1080	6,3	1,9	1,8	1,2
295	B3(10%)+C400(6/3)+calc g.(3/3)	690	600+600	1200	1200	70	14,5	7,0	1030	3,8	1,6	1,5	1,1
296	Bitume B3(10%)+ sable X (3/3)	690	1200	1200	1200	70	19,5	10,5	1020	3,2	1,1	1,7	1,4
297	Bitume B3(10%)+ sable X (3/3)	690	1200	1000	1200	70	18,0	12,0	1045	3,5	1,6	1,5	1,5
298	B3(10%)+LA35(3/3)	690	1200	1200	120	70	19,5	11,5	1030	3,5	2,3	1,7	1,1
299	B3(10%)+LA35(3/3)	690	1200	900	1200	70	17,0	12,5	1135	5,5	1,6	1,3	0,9
300	B3(10%)+LA35(5/3)	690	900	1000	1500	70	18,5	9,0	1100	3,8	1,3	1,7	1,1
301	B3(10%)+sable X (5/3)	690	900	1000	1500	70	19,0	8,5	1015	2,8	1,9	1,6	0,7
302	Cure (3A+22R)	690	1200	1200	1200	70	13,5	15,0	1125	6,4	1,6	1,0	0,6
303	Cure (3A+12R)	690	1200	1200	1200	70	12,5	14,5	1060	5,9	1,2	1,3	1,2
304	Cure (0A+12R)	690	1200	1200	1200	70	-	-	1125	4,2	1,5	1,7	1,0
305	Cure 4A+(3R+3G+3A)	660	1200	1200	1200	70	12,5	16,0	140	6,9	1,2	0,8	0,9
306	Cure 4A+(3G+3R+3A)	660	1200	1200	1200	70	13,0	14,5	1135	7,6	1,5	0,7	0,9
307	Cure 4A+(3G+3R+3A)X2	660	1200	1200	1200	70	12,5	15,5	1150	7,0	1,3	0,7	0,7
308	Cure 4A+(3G+3R+3A)X3	660	1200	1760	1200	70	12,5	15,0	1160	6,4	1,5	0,7	0,6
309	Carbonatation-Na ₂ CO ₃ (5%)	690	1200	1760	1200	70	14,0	13,5	865	2,6	3,8	2,3	2,2
310	Carbonatation-NaHCO ₃ (5%)	690	1200	1400	1200	70	20,0	10,0	960	2,5	2,8	1,7	1,5
311	Carbonatation-Na ₂ CO ₃ (10%)	660	1200	1400	1200	70	13,5	15,0	1045	2,8	2,7	1,8	1,8
312	Carbonatation-NaHCO ₃ (5%)	660	1200	1400	1200	70	21,0	10,5	1080	3,7	2,2	1,2	1,0
313	Cure (45A)	660	1200	1400	1200	70	12,5	15,5	1050	5,4	1,5	1,4	1,0

ANNEXE III.10- sapin (314-331)

Ep	Traitement	B	C	E	S	A	t(h)	$\Delta(^{\circ}\text{C})$	MV	MOR	Cy0	Cy1	Cy2
314	Cure 4X(7A+1G)+13 A	660	1200	1300	1200	70	12,0	16,0	1135	6,2	1,7	1,1	0,9
315	Carbonatation-Na ₂ CO ₃ (2,5%)	660	1200+30	1400	1200	70	14,5	15,0	1090	4,6	1,9	1,8	1,2
316	Carbonatation-NaHCO ₃ (2,5%)	660	1200+30	1400	1200	70	14,0	16,0	1075	4,2	2,6	1,7	0,9
317	Carbonatation-Na ₂ CO ₃ (2,5%)-dissout	660	1200+30	1400	1200	70	13,5	15,5	1110	4,9	2,1	1,3	0,8
318	Carbonatation-NaHCO ₃ (2,5%)-dissout	660	1200+30	1400	1200	70	20,5	13,0	1050	4,2	2,8	1,6	1,1
319	Cure 4A+(3R+3G+3A)+23R	660	1200	1300	1200	70	13,0	15,5	1100	6,1	1,3	0,8	0,4
320	Cure 4A+(15R+1G)X2	660	1200	1300	1200	70	12,5	15,5	1090	6,0	0,9	0,7	0,6
321	Carb: TM=1j TT=3h (eau)	660	1200	1300	1200	70	-	-	1020	3,3	1,0	0,9	0,9
322	Carb: TM=4h TT=3h (eau)	660	1200	1100	1200	70	-	-	1085	4,0	1,4	1,0	1,0
323	Carb: TM=4h TT=3h (air)	660	1200	1100	1200	70	-	-	1060	3,8	2,0	1,6	1,2
324	Carb: TM=1h TT=1h (air)	660	1200	900	1200	70	-	-	1115	4,7	0,1	1,0	0,8
325	Carb: TM=1h TT=8h (air)	660	1200	900	1200	70	-	-	1110	5,0	2,2	1,4	0,9
326	Carb: TM=1j TT=1h (eau)	660	1200	900	1200	70	-	-	1145	4,3	1,6	0,6	0,6
327	Carb: TM=1j TT=8h (eau)	660	1200	900	1200	70	-	-	1135	5,4	1,7	0,9	0,8
328	Carb: TM=1j TT=1h (eau)+chaux	660	1080+120	900	1200	70	-	-	1100	5,9	1,9	1,5	1,2
329	Carb: TM=2j TT=1h (eau)	660	1200	900	1200	70	-	-	1125	6,0	1,7	1,0	0,8
330	carb: sapin référence (eau)	660	1200	1200	0	0	-	-	715	3,4	6,6	5,5	4,0
331	Carb: TM=1j TT=1h (eau)	660	1200	900	1200	70	-	-	1140	4,7	1,9	1,3	0,9

ANNEXE III.11 Variations dimensionnelles des éprouvettes de 400 mm

Ep	Ajout	G0	R1	G1	R2	G2	Cy 0	Cy 1	Cy 2
T1		0,3	1,1	-0,2	1,1	-0,4	1,4	0,8	0,7
		0,3	1,0	-0,2	1,1	-0,4	1,3	0,8	0,8
		0,3	1,1	-0,1	1,1	-0,3	1,4	1,0	0,8
T2		0,3	0,1	-	-	-	-	-	-
		0,0	1,0	-0,3	1,3	-0,5	1,1	0,7	0,8
		0,4	0,7	0,2	0,7	0,0	1,1	0,9	0,6
T3		0,4	0,7	-0,1	-	-	-	-	-
		0,4	0,8	-0,2	1,1	-0,5	1,2	0,6	0,6
		0,4	0,9	-0,3	1,1	-0,4	1,3	0,7	0,7
T4	MgCl2	1,0	0,1	0,7	0,1	1,0	1,1	0,8	1,1
		1,2	-0,2	1,1	-0,2	1,1	1,0	0,9	0,9
		1,5	-0,3	1,4	-0,4	1,1	1,2	1,1	0,8
T5		0,7	0,0	0,7	0,1	0,8	0,7	0,7	0,8
		0,8	-0,1	0,8	-0,1	0,8	0,7	0,7	0,7
		1,0	-0,3	0,9	-0,3	0,7	0,8	0,6	0,4
T6		-	0,9	-0,1	0,7	-0,1	-	0,8	0,6
		-	-0,3	0,9	-0,4	1,0	-	0,5	0,6
		-	0,3	0,5	0,2	0,6	-	0,7	0,8
T7	MgCl2	-	0,3	0,6	0,1	1,0	-	0,9	1,1
		-	0,6	0,5	0,5	0,5	-	1,0	0,9
		-	0,5	0,8	0,4	0,9	-	1,3	1,2

ANNEXE IV

EVALUATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES CBC

IV.1 EPROUVETTES R, V, T

Pour un certain nombre de traitements, on a comparé les possibles modifications de la résistance mécanique des éprouvettes **R** et **V**, par rapport à celle de l'éprouvette **T**. On rappelle que dans la plus grande partie des cas, les éprouvettes **T** sont écrasées après 7 jours, tandis que les deux autres le sont au delà de 60 jours. On peut imaginer que l'alternance de cycles d'humidification et de séchage, endommage la résistance des éprouvettes, en provoquant l'apparition d'un réseau de fissures. En revanche, le cycle d'humidification induit des conditions optimales pour la recatrisation de la matrice, lors d'un nouveau cycle de séchage. De cette manière, les probables affaiblissements causés par les fissures sont contrecarrés par la recatrisation et par l'âge plus important de l'éprouvette. La figure IV.1 représente les comparaisons des résistances mécaniques des éprouvettes **R** et **V**, avec celle de l'éprouvette **T**.

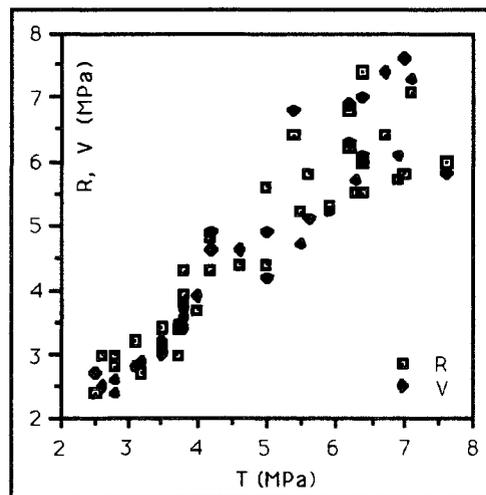


Figure IV.1 - Comparaison entre les éprouvettes **R** et **V** avec **T**

On vérifie que les résultats obtenus sur les éprouvettes **R** et **V** sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus sur l'éprouvette **T**. En effet,

sur la figure IV.1, les différentes valeurs sont bien situées autour de la première bissectrice. La figure IV.2 donne l'intervalle de variation des valeurs sur les trois types d'éprouvettes.

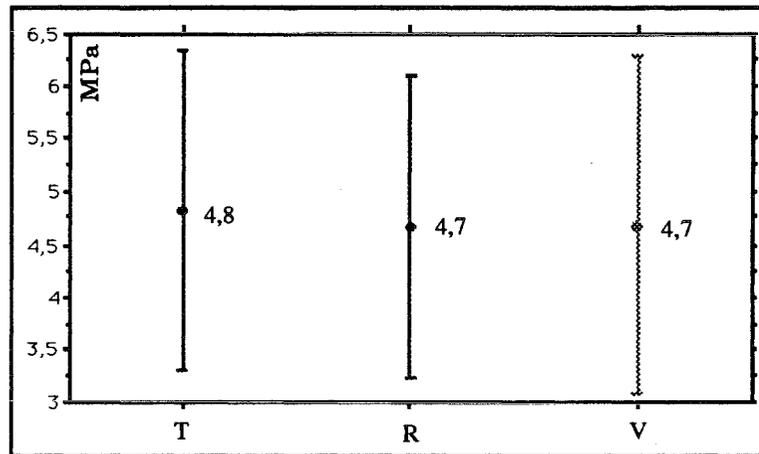


Figure IV.2- Amplitudes des résistances obtenues (MPa)

L'analyse statistique réalisée confirme que les résultats des résistances à l'écrasement obtenus sur les trois types d'éprouvettes ne sont pas différents. On remarque, que les moyennes de l'ensemble des essais, peuvent être considérées comme étant égales. On peut donc conclure, que les traitements subis par les éprouvettes ne modifient pas leurs performances mécaniques. La résistance mécanique de l'éprouvette **T**, âgée de 7 jours, donne une bonne indication de la résistance finale du CBC, qui doit être considérée lors de l'exécution des ouvrages. En effet, les conditions sévères auxquelles sont exposées les éprouvettes sont semblables à celles d'un vieillissement naturel de plusieurs années.

IV.2 FLEXION STATIQUE DES CBC

Selon la littérature, un des principaux atouts des CBC est d'améliorer le comportement des composites à base de ciment, lors des essais en flexion statique. Dans ce cas, pour vérifier le comportement des CBC, on a utilisé les éprouvettes **T1** à **T7**, présentées antérieurement, et une éprouvette en béton (**Bt1**). Nous avons également étudié d'autres éprouvettes ayant la même composition, mais dont les dimensions sont de 40 x 40 x 500 mm. De tels CBC ont été comparés à des éprouvettes de béton (**Bt2**), et de mortier (**Mt1**).

Lors des essais en flexion statique (MOR-F), les éprouvettes sont généralement cassées dans la région moyenne. On a récupéré les deux morceaux, et effectué des essais à l'écrasement (MOR-C). Le tableau IV.1 représente les résultats obtenus, ainsi que le rapport entre les résistances à l'écrasement et à la flexion. Les éprouvettes représentées dans la première colonne ont des dimensions 100 x 100 x 400 mm, tandis que celles représentées dans la cinquième colonne ont des dimensions 40 x 40 x 500 mm.

Ep	MOR-F	MOR-C	C/F	Ep	MOR-F	MOR-C	C/F
T1	1,9	7,0	3,7	V4	3,4	4,9	1,4
T2	2,5	5,8	2,3	V5	2,1	3,6	1,7
T3	2,8	7,2	2,6	V6	2,4	4,0	1,7
T4	2,2	7,0	3,2	V10	2,9	5,1	1,8
T5	2,1	8,0	3,8	V11	2,8	5,3	1,9
T6	2,3	8,6	3,7	V12	3,0	6,0	2,0
T7	1,9	8,0	4,2	Mt1	5,1	11,7	2,3
Bt1	5,6	31,0	5,5	Bt2	7,0	22,2	3,2

Tableau IV.1 - Résultats de flexion statique et d'écrasement

Il y a une réduction considérable de la résistance à l'écrasement de toutes les éprouvettes, de la partie droite du tableau. Ceci est probablement dû au mauvais tassement, ou à la présence d'importantes fissures dues aux mouvements de l'eau dans l'éprouvette. Toutefois, la résistance à la flexion statique a légèrement augmenté.

On observe que le béton présente une plus grande résistance, ainsi qu'un rapport entre les résistances à la compression et celle à la flexion la plus élevée, indépendamment de la taille des éprouvettes. Toutefois, le comportement des éprouvettes lors des essais est très différent. Les CBC présentent une rupture lente, et même après la charge maximale, les éprouvettes résistent à une charge considérable. Les éprouvettes en béton présentent une rupture fragile ("explosive"), et la charge descend

brusquement à zéro. On peut affirmer que les CBC ont un rôle sécuritaire, ce qui confirme les affirmations de SORFA (1984) et AROLA (1993).

Lors des essais d'écrasement, les éprouvettes ont un comportement semblable au bois. On note la présence d'importantes fissures selon la diagonale de l'éprouvette, ce qui caractérise une rupture par cisaillement (figure IV.3).

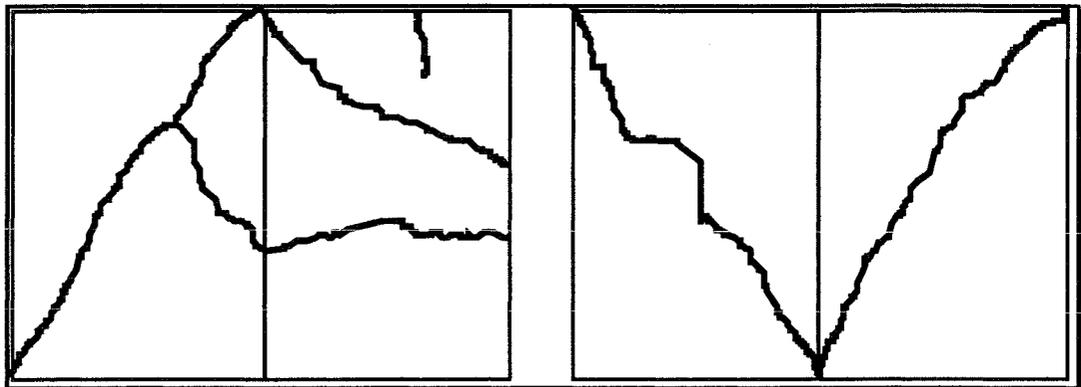


Figure IV.3 - Surface développée des éprouvettes testées en compression

Lors des essais en flexion statique, les éprouvettes en béton ou en mortier, se cassent nettement selon la direction du plan de la charge. En revanche, les CBC ne présentent pas une direction de fracture préférentielle. On observe la présence de fissures inclinées par rapport au plan de charge. Les éprouvettes, surtout celles à matrice renforcée, ne se divisent pas en deux morceaux. Dans de nombreux cas, il a fallu ensuite scier les éprouvettes testées en flexion statique, pour obtenir celles destinées aux essais de compression.

IV.3 ESSAIS DE COMPRESSION DIAMÉTRALE (METHODE BRESILIENNE)

Pour vérifier le comportement en compression diamétrale des CBC avec ou sans renforcement de la matrice, du béton (**Bt**) et du mortier (**Mt**), on a fabriqué des éprouvettes cylindriques de 53 mm de diamètre et d'environ 110 mm de longueur. Les compositions en bois, ciment, eau, sable et gravier (**B/C/E/S/G**), des différentes éprouvettes, sont représentées dans le tableau IV.2.

Ep	Bois	Ciment	Eau	Sable	Gravier
CBC	50	90	90	0	0
CBC renf	45	90	70	90	0
Mortier	0	90	40	270	0
Béton	0	90	45	150	280

Tableau IV.2 - Composition des éprouvettes (g)

La charge a été appliquée selon une génératrice de l'éprouvette, par l'intermédiaire d'une plaque métallique. La contrainte de rupture C_d (en MPa) a été calculée par la formule présentée dans le paragraphe II.3.6.1. La résistance spécifique (**R spec**) est définie comme égale à 1000 fois le rapport entre C_d et la masse volumique. Les résultats sont reportés dans le tableau IV.3.

Ep	h(mm)	poids(g)	MV(kg/m ³)	Charge(kgf)	Cd(MPa)	R spec
Bt 01	106	510	2197	2801	3,2	1,4
Bt 02	102	501	2243	3834	4,5	2,0
Bt 03	107	523	2232	2588	2,9	1,3
Moyenne			2224		3,5	
Mt 04	103	384	1703	950	1,1	0,7
Mt 05	104	400	1757	1287	1,5	0,8
Mt 06	100	368	1681	777	0,9	0,6
Moyenne			1713		1,2	
CBC 07	108	127	537	433	0,5	0,9
CBC 08	108	130	550	452	0,5	0,9
CBC 09	109	138	578	543	0,6	1,0
Moyenne			555		0,5	
CBC 10	95	244	1173	848	1,1	0,9
CBC 11	95	243	1168	868	1,1	0,9
CBC 12	94	242	1176	836	1,1	0,9
Moyenne			1172		1,1	

Tableau IV.3 - Résultats de compression diamétrale

Les éprouvettes en béton ont un comportement moins uniforme par rapport aux autres. En réalité, on a fabriqué une sorte de "micro-béton", car la taille réduite des moules ne permettait pas l'utilisation de graviers de taille importante, normalement utilisés lors de la fabrication du béton ordinaire. La position occupée par les agrégats plus grossiers, peut entraîner lors de l'écrasement diamétrale, l'apparition de fissures qui réduisent ainsi la résistance mécanique.

Si on compare les résistances des éprouvettes en compression diamétrale et celles en compression parallèle présentées dans le tableau IV.1, on détermine dans le cas du béton, un rapport 1/9 conforme à ceux notés dans la littérature. Dans le cas d'éprouvettes en CBC, le rapport est de l'ordre 1/5. On rappelle que les rapports obtenus entre les résistances à la flexion et à la compression parallèle, sont respectivement : 1/6 pour le béton et 1/3 pour le CBC. Parmi les formules permettant d'évaluer la résistance du béton en traction (paragraphe II.3.6.1), celle proposée par ADAM et coll. (1981) donne les meilleurs résultats.

Compte tenu des comparaisons entre les différentes résistances des éprouvettes, on peut affirmer que les CBC présentent un comportement mécanique plus "homogène" que celui du béton. De plus, on a pu confirmer, lors des essais de compression diamétrale, le rôle positif des particules. En effet, quelque soit le type d'essai, on constate toujours les mêmes différences de comportement entre le béton et le CBC.

Dans le cas des éprouvettes en béton et en mortier, on observe une rupture fragile ("explosive"), et la présence d'une fissure parallèle à la direction de la charge. Dans le cas de CBC à matrice renforcée, la fissure est non-linéaire, tandis que dans le cas du CBC sans renforcement, on observe une importante déformation latérale et l'absence de rupture (figure IV.4).

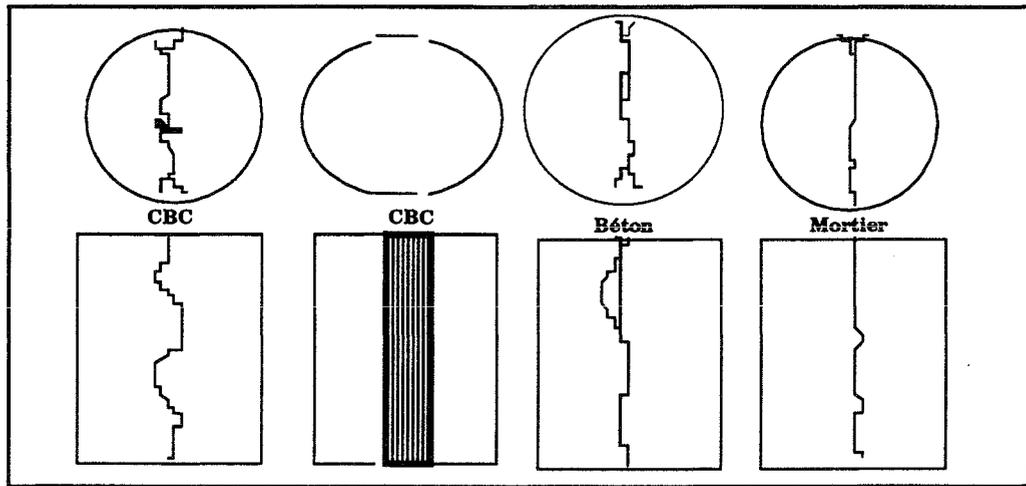


Figure IV.4 - Vue frontale et supérieure des éprouvettes

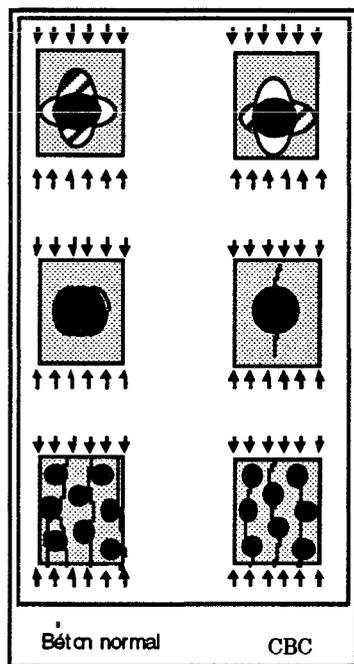


Figure IV.5 - Rupture du béton et du CBC (D'après AVRAM et coll., 1981)

Les deux schémas de la figure IV.5 représentent la distribution des contraintes de traction et de compression (zone hachurée) au voisinage des agrégats, lors d'un chargement en compression. On observe, ensuite, que pour le CBC, les fissures indiquent une fracture non linéaire.

Dans la fabrication du CBC, il semble que la présence du bois ne soit pas très importante pour leurs caractéristiques, car l'on utilise environ 25% en poids de bois par rapport au ciment et au sable. Toutefois, l'analyse d'image réalisée sur le CBC, a permis de constater une proportion de particules, en surface, de l'ordre de 60%. La présence de particules de bois permet donc de comprendre le comportement de la matrice lors des essais mécaniques, et notamment sa légèreté, sa capacité phonique et sa résistance aux chocs.

IV.4 EVALUATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU CBC PAR DES METHODES NON- DESTRUCTIVES

Les produits à base de ciment, qui sont fabriqués par moulage, présentent des hétérogénéités issues du procédé de fabrication. Dans le cas du CBC, on a constaté des différences au niveau des variations dimensionnelles, car la déformation obtenue selon l'axe x est inférieure à celle obtenue sur l'axe y (axe de tassement).

Toutefois, on ne connaît pas les conséquences de l'hétérogénéité, sur la résistance mécanique de l'éprouvette. On a choisi quatre éprouvettes (T4, T5, T6 et T7) de dimensions 100 x 100 x 400 mm, sur lesquelles on a mesuré la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Les résultats obtenus sur l'éprouvette T5, sont représentés dans la figure IV.6. La région hachurée correspond à la face supérieure (axe y), selon laquelle on réalise le tassement des éprouvettes.

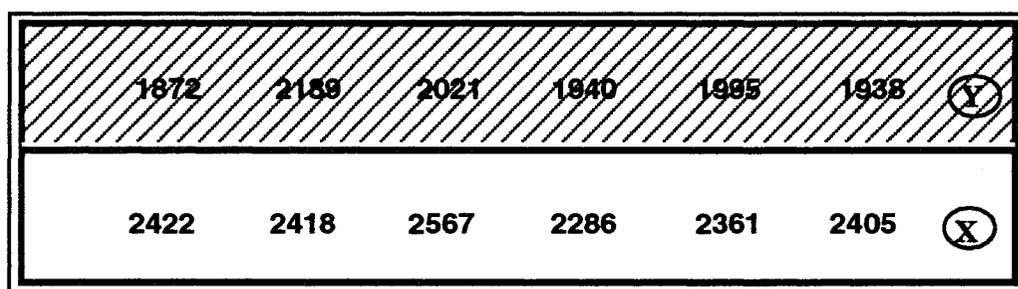


Figure IV.6 - Vitesses de propagation de l'onde selon les axes x et y (en m/s)

L'analyse statistique réalisée a confirmé que la différence entre les vitesses V_x et V_y , pour les quatre éprouvettes, sont significatives à 95%. Les vitesses V_x sont 15% supérieures à V_y . De plus, on a vérifié que les vitesses V_z (axe longitudinal) sont du même ordre que V_x . On peut donc considérer que, le CBC présente un comportement non-uniforme aux essais non-destructifs, ce qui est différent du cas du béton, où le tassement a un faible effet sur la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore (JONES, 1967).

Les vitesses moins rapides obtenues sur l'axe y sont probablement dues au procédés de fabrication, ainsi qu'à une surface plus irrégulière, ce qui empêche un bon contact avec les "transducteurs". En conséquence on obtient un temps de passage plus long pour l'onde, et donc une vitesse plus

réduite. Toutefois, les résistances mécaniques obtenues lors de l'écrasement des éprouvettes, indépendamment de l'axe x ou y considéré, ne sont pas significativement différentes. Le comportement des éprouvettes selon l'axe y semble gouverner la résistance globale de l'éprouvette, et reste encore le plan de faiblesse de l'ensemble.

IV.4.1 CORRELATION ENTRE LES VITESSES ULTRASONORES ET LA RESISTANCE À L'ECRASEMENT DES CBC

On a évalué, de manière systématique, la résistance mécanique des différentes éprouvettes CBC, par la mesure des vitesses ultrasonores. On rappelle que les essais destructifs d'écrasement sont réalisés selon l'axe y , tandis qu'on a mesuré les vitesses selon l'axe x . On a choisi ce procédé, parce que l'état des surfaces latérales des éprouvettes convient mieux aux contacts des "transducteurs".

On rappelle que l'âge des éprouvettes n'est pas le même. Les éprouvettes **T** ont 7 jours, tandis que celles correspondantes aux cycles de vieillissement (**R** et **V**), ont plus de 70 jours. Toutefois, on a déjà montré que les éprouvettes **R**, **V** et **T** ne présentaient pas de différence au niveau de la résistance mécanique, et on les a considérées ensemble, pour chaque espèce. Les résultats sont représentés dans la figure IV.7.a et IV.7.b.

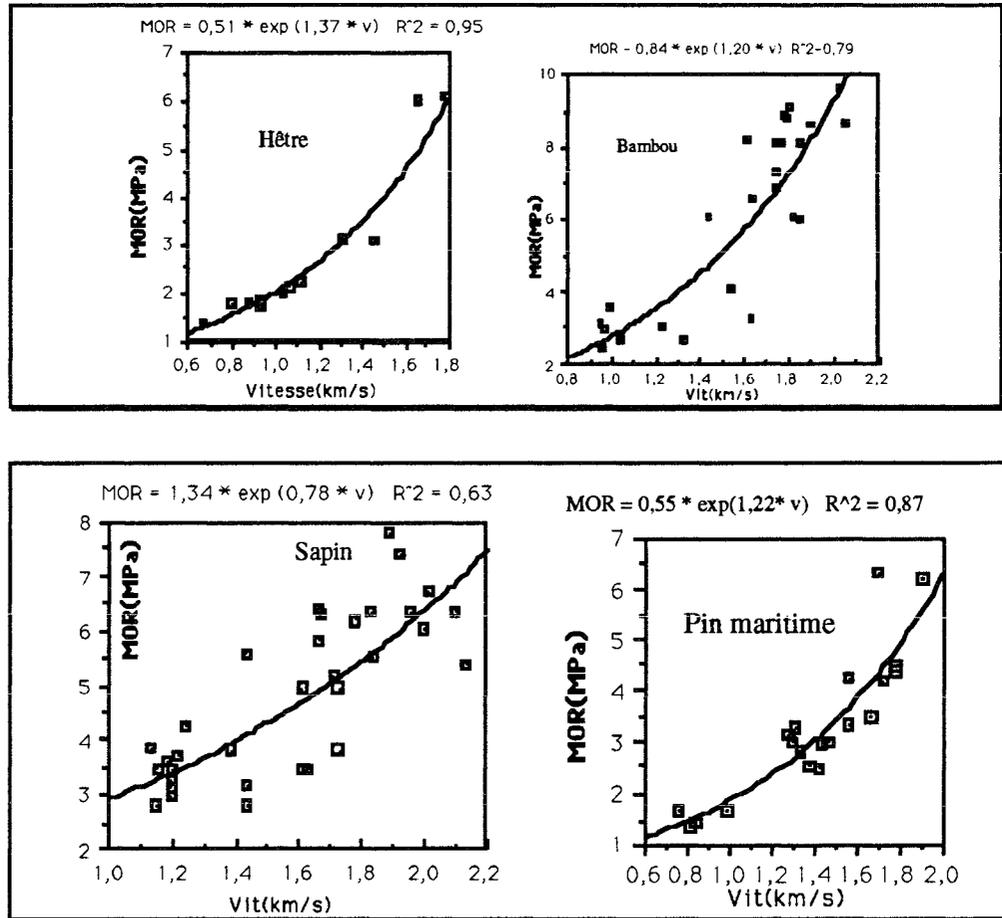


Figure IV.7 a et b - Corrélation entre la vitesse (km/s) et la résistance mécanique (MPa)

On rappelle, que les éprouvettes présentent de très grandes différences au niveau de la composition. Si on considère que les particules de chaque espèce ne jouent pas un rôle important sur la mesure des vitesses de propagation, en revanche, la constitution de la matrice est souvent variable. On remarque que les points de la courbe du sapin sont plus dispersés par rapport aux autres espèces, probablement que ceci est du aux importantes modifications au sein de la matrice. Dans la figure IV.8 on représente l'ensemble des données obtenues avec les quatre espèces.

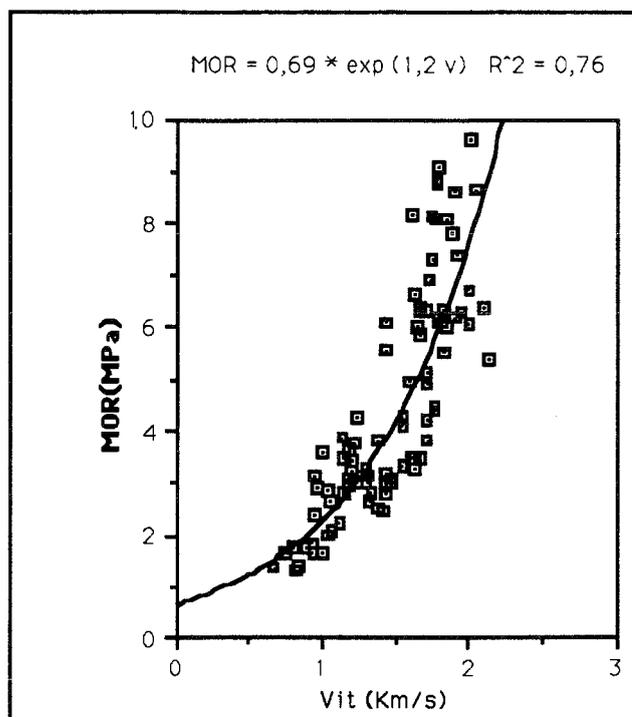


Figure IV.8 - Corrélation entre la vitesse et la résistance pour l'ensemble des espèces

Les vitesses obtenues sont comprises dans une large fourchette allant de 0,8 à 2,2 km/s. La vitesse maximale est d'environ la moitié de celle obtenue sur le béton ordinaire. Les vitesses ont été obtenues sur des éprouvettes qui ont atteint un taux considérable d'hydratation. Cependant, on ne connaît pas l'évolution de leurs vitesses au cours du temps.

IV.4.2 MODIFICATIONS DE LA VITESSE ULTRASONORE AU COURS DU TEMPS- EFFET DU VIEILLISSEMENT DE L'ÉPROUVETTE

Le CBC est un système complexe constitué d'agrégats, de ciment, d'eau et d'air. Ce système est dynamique, car la réaction d'hydratation modifie d'une manière importante la constitution de la matrice, ainsi que la distribution des surfaces occupées par l'eau et par l'air, au cours du temps.

L'onde qui traverse l'éprouvette rencontre tous les constituants du CBC (particules, agrégats, ciment, air, eau). Le temps de cheminement représente la somme du passage de tous ces éléments.

Les vitesses de l'onde dans l'air et dans l'eau sont, respectivement de, 340 m/s et 1497 m/s (JONES et FACAOARU, 1969). On doit s'attendre dans un premier temps, à une valeur de la vitesse sur les éprouvettes, qui doit être entre ces deux valeurs, dans le cas de CBC dont la matrice n'est pas

renforcée. Il faut tenir compte de la présence importante de défauts tels que les espaces intersticiels, qui augmentent le temps de passage de l'onde. Le temps de prise ne peut pas être indiqué comme étant le moment où la vitesse de l'onde dans l'éprouvette dépasse celle de l'onde dans l'eau. Toutefois, le temps de durcissement est théoriquement indiqué par la présence d'une valeur constante de la vitesse.

IV.4.2.1 CAS DES EPROUVETTES CYLINDRIQUES

Pour étudier les modifications des vitesses ultrasonores dans les éprouvettes, au cours du temps, on a d'abord choisi des éprouvettes cylindriques, de 53 mm de diamètre et d'environ 110 mm de hauteur. Un dispositif (figure 22) permet le démoulage des éprouvettes, immédiatement après le tassement. La figure IV.9 représente les résultats obtenus sur deux différents CBC.

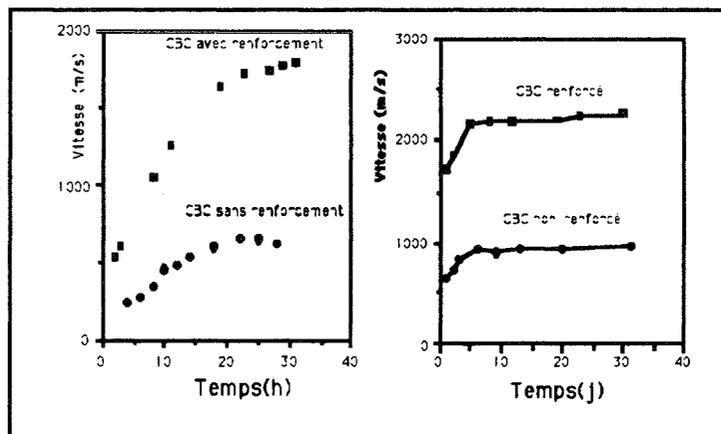


Figure IV.9 - Modifications des vitesses ultrasonores dans les CBC au cours du temps

On constate dans la figure de gauche, qu'il y a un changement de la pente des deux courbes, au environ de 15 heures, ce qui est très proche du temps de prise du CBC (14 heures). De plus, dans le cas du CBC non renforcé (sans sable), la vitesse de propagation sur des éprouvettes qui ont été fabriquées 8 heures auparavant est inférieure à celle de la vitesse de l'onde dans l'air. En effet, la structure d'un tel CBC, est très proche de celle d'un béton caverneux dont les liaisons entre les constituants sont assurées par des "ponts". On peut donc imaginer, qu'il faut un minimum de ces "ponts" pour obtenir une vitesse de propagation de l'onde qui dépasse celle de l'air.

La figure de droite permet de confirmer que la valeur des vitesses se stabilise aux alentours du septième jour, on peut considérer que les différences que l'on obtient au delà de cet âge, sont probablement dues à des erreurs de mesure. On ne croit pas que la technique soit suffisamment sensible, pour différencier les faibles modifications apportées au sein de la matrice par le vieillissement. De plus, on a pu confirmer que les vitesses de propagation maximales pour les CBC renforcés ou non, étaient de l'ordre de, respectivement, 2,2 km/s et 1 km/s.

Les résultats présentés dans la figure IV.9 ont été obtenus sur des éprouvettes mouillées. Il est difficile de séparer les effets sur les vitesses ultrasonores, dus à la modification de la matrice à la suite de la réaction d'hydratation. L'analyse statistique sur les éprouvettes sèches ou mouillées prouve l'influence de la cure sur les vitesses ultrasonores. Dans le cas des CBC renforcés, la conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours, permet d'obtenir une vitesse 10% plus élevée que celle obtenue sur des éprouvettes identiques, qui ont été stockées à l'air. Cette constatation est en accord avec celle trouvée sur le béton par JONES et FACAOARU (1969). Toutefois, on ne constate pas un effet semblable dans le cas des éprouvettes de CBC non renforcées (figure IV.10).

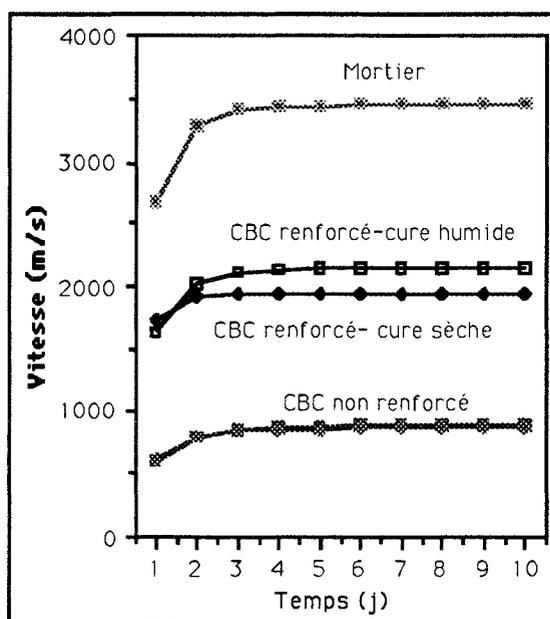


Figure IV.10 - Comparaison entre les vitesses ultrasonores

Les courbes pour les différentes éprouvettes, dont une en mortier, ont été obtenues à partir du logiciel "Lissages", par l'équation:

$$v = a_1 * (1 - \exp(-a_2 * t))$$

Le coefficient a_1 représente la valeur maximale de la vitesse (quand la valeur du temps tend vers l'infini), tandis que a_2 indique la "vitesse d'hydratation" de l'éprouvette. Selon le modèle employé, les éprouvettes présentent des valeurs maximales aux alentours du cinquième jour. Le tableau IV.4 représente les coefficients des équations obtenues par un certain nombre d'éprouvettes de même nature.

Éprouvette	Cure	a1	a2
CBC-renforcé	humide	2151	1,42
CBC-renforcé	sèche	1950	2,15
CBC-non renforcé	humide	885	1,15
CBC-non renforcé	sèche	865	1,26
Mortier 1:2	humide	3447	1,50

Tableau IV.4 - Coefficients a_1 et a_2 des éprouvettes

Le CBC renforcé, qui a subi un séchage à l'air, présente un coefficient a_2 plus élevé que celui du CBC ayant été immergé dans l'eau. La vitesse obtenue sur l'éprouvette sèche, est plus importante que celle obtenue sur l'éprouvette mouillée, jusqu'à 36 heures, et ensuite il y a effet contraire. On vérifie que la réaction d'hydratation est plus rapide dans le cas d'éprouvettes ayant subi un séchage. En conséquence, leurs résistances mécaniques sont plus faibles, en effet, on constate une diminution de 20% de la résistance à l'écrasement. Pour les CBC non renforcés, on n'a pas pu vérifier les mêmes différences entre les résistances mécaniques.

A la fin des essais précédents, on a effectué l'écrasement des éprouvettes, et on a corrélé les vitesses ultrasonores avec la résistance. La figure IV.11 représente les résultats obtenus.

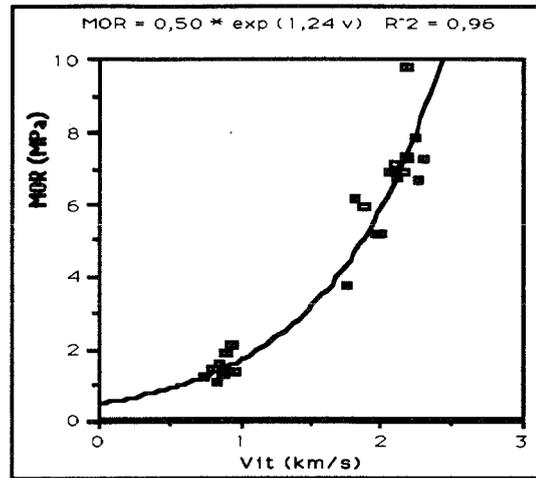


Figure IV.11 - Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la résistance

On confirme l'adéquation du choix du modèle pour expliquer la dépendance entre la résistance mécanique et la vitesse ultrasonore. La valeur élevée du coefficient de corrélation est probablement due à l'homogénéité des éprouvettes. En effet, la forme cylindrique des éprouvettes, ainsi que leurs dimensions, permettent un meilleur tassement. Selon le modèle, si l'on obtient une vitesse de 2 km/s sur l'éprouvette, sa résistance mécanique sera de l'ordre de 6 MPa.

IV.4.2.2 CAS DES ÉPROUVETTES CUBIQUES

Les éprouvettes de 292 jusqu'à 301 ont été choisies pour évaluer les modifications des vitesses au cours du temps. On a fait trois repères sur chaque éprouvette (**R**, **V**, **T**), de manière à permettre de mesurer les vitesses selon les trois axes **x**, **z** et **y** (axe de tassement). Dans certains cas, une variation de la mesure des vitesses ultrasonores n'a pas permis d'obtenir les coefficients **a₁** et **a₂** par le logiciel "Lissages".

On a pu constater également un comportement semblable pour des vitesses ultrasonores obtenues selon les axes **x** et **z**, tandis que celles obtenues selon l'axe **y** ont été sensiblement réduites. Les constantes élastiques **C_{ij}** (en MPa) étant données par le produit de la masse volumique (en kg/m³) par le carré de la vitesse (m/s) sont donc différentes (tableau IV.5).

Ep	MV	v_x	v_z	v_y	C₁₁	C₂₂	C₃₃
292	1091	2143	2011	1662	5000	4400	3000
293	1070	1883	1887	1605	3800	3800	2800
294	1104	2016	2038	1828	4500	4600	3700
295	1050	1745	1707	1383	3200	3100	2000
296	1057	1954	1957	1435	4000	4000	2200
297	1069	1828	2022	1616	3600	4400	2800
298	1075	2158	2040	1630	5000	4500	2900
299	1166	2346	2353	1829	6400	6500	3900
300	1092	2129	1878	1721	5000	3900	3200
301	1007	1739	1919	1436	3000	3700	2100

Tableau IV.5 - Constantes élastiques des CBC (en MPa)

Les vitesses ultrasonores dans les CBC, ainsi que la masse volumique, sont d'environ la moitié de celles correspondantes au béton. On doit s'attendre à des constantes élastiques de l'ordre de 1/8 de celles du béton. Si pour le béton, la valeur est de 30000 MPa, théoriquement pour le CBC, la valeur est de l'ordre de 4000 MPa.

Nous avons effectué nos essais sur une machine INSTRON 4106, les résultats obtenus n'ont jamais été satisfaisants (module d'élasticité < 1000 MPa). L'erreur provient probablement d'une imperfection dans l'acquisition des données des déformations. On a réalisé quelques essais pour obtenir le module élastique du CBC avec l'aide de comparateurs placés selon la longueur de l'éprouvette. On a pu confirmer que les valeurs du MOE pour les éprouvettes **T1**, **T2** et **T3** (annexe III), sont comprises entre 2500 et 3500 MPa.

De plus, si on considère que la masse volumique du CBC est de l'ordre de 1100 kg/m³, et qu'il a une résistance à l'écrasement de l'ordre de 5 MPa, l'utilisation de la formule présentée par DREUX (1986) permet d'obtenir un module élastique de l'ordre de 3000 MPa. On constate que les valeurs des constantes élastiques par ultrason sont comprises entre 2000-5000 MPa (tableau IV.5).

Toutefois, on n'a pas pu obtenir les vitesses ultrasonores transversales dans les éprouvettes. Les dimensions des éprouvettes ne nous permettaient pas de mesurer le coefficient dynamique de Poisson, et donc, le facteur de correction.

Compte tenu des difficultés pour mesurer les vitesses transversales sur les éprouvettes de 100 x 100 x 100 mm, on a testé des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 500 mm, par la méthode de fréquence de résonance. On a obtenu la fréquence de résonance longitudinale (f_l) et en flexion (f_f) en Hertz.

Le tableau IV.6 représente les résultats obtenus sur des éprouvettes en CBC (l'éprouvette **V9** est un béton).

Ep	MV	f_f	f_l	v_{fl}	v_{us}	$f(v)$	ν	E_{ff}	E_{fl}	E_{us}
V1	1045	252	1740	1740	1806	0,93	0,17	2600	2900	3200
V2	1028	232	1560	1560	1645	0,90	0,20	2300	2300	2500
V4	1172	253	1780	1780	1873	0,90	0,20	2900	3300	3700
V5	1156	249	1760	1760	1846	0,91	0,19	3500	3300	3600
V10	1058	290	1940	1940	2025	0,92	0,18	3300	3700	4000
V11	1137	299	1980	1980	2042	0,94	0,16	3800	4200	4400
V12	1106	288	1970	1970	2076	0,90	0,20	3600	3900	4300
V9	2144	538	3710	3710	3834	0,94	0,16	23000	28000	30000

Tableau IV.6 - Modules et coefficients dynamiques du CBC et du béton

La vitesse ultrasonore longitudinale est environ 5% supérieure à celle obtenue en résonance. Toutefois, à l'exception de l'éprouvette **V5**, on constate des différences importantes entre les deux modules dynamiques (E_f et E_l). Le module obtenu par ultrason représente une valeur d'environ 20% supérieure à celle obtenue par résonance. Les modules dynamiques du CBC sont de l'ordre de 3000 MPa, tandis que le coefficient de Poisson est compris entre 0,16 et 0,20.

IV.5 CONCLUSIONS SUR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

Au niveau des connaissances actuelles, on peut affirmer que les méthodes non destructives sont intéressantes pour l'étude du comportement mécanique des éprouvettes, car les coefficients de corrélation entre la vitesse ultrasonore et la résistance mécanique à l'écrasement sont élevés. La méthode s'avère intéressante pour suivre les étapes d'hydratation et de durcissement des éprouvettes, ainsi que l'effet des adjuvants (sucres), au cours du temps. Toutefois, la méthode n'est pas suffisamment sensible pour détecter les modifications subies par la matrice au cours des étapes d'humidification et de séchage.

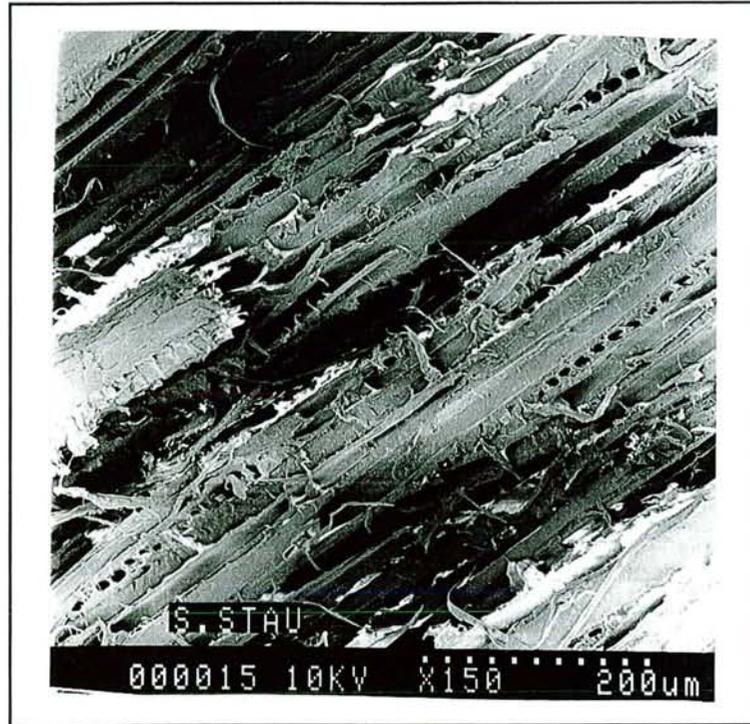
On a pu constater que les modifications de la valeur des vitesses ultrasonores sont très intenses pour les éprouvettes fraîchement fabriquées. La stabilisation de la vitesses ultrasonore dans les CBC dépend de leurs dimensions. Pour les éprouvettes cylindriques, on a observée cette stabilisation après 3 jours, tandis que dans le cas des éprouvettes cubiques il a fallu attendre 7 jours. On rappelle que, dans le cas du béton, la vitesse augmente très lentement à partir d'un certain temps, ce qui rend difficile l'évaluation de la résistance par la mesure des vitesses de propagation (JONES et FACAOARU, 1968).

La méthode a également permis de constater l'hétérogénéité des éprouvettes. En effet, la vitesse obtenue selon l'axe y est nettement différente de celle obtenue sur les deux autres axes. Toutefois, on n'a pas pu confirmer cette observation lors des essais mécaniques. Probablement, qu'il y a un changement du comportement mécanique de l'éprouvette, sans qu'en même temps, il existe une diminution de la résistance mécanique. Toutefois, les constantes élastiques du CBC cubique ne sont pas faciles à mettre en évidence par la méthode ultrasonore, surtout compte tenu des dimensions des éprouvettes (faible signal dans le cas de la vitesse transversale). La méthode de résonance sur des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 500 mm, nous a permis d'obtenir d'une façon rapide les constantes élastiques dynamiques du CBC.

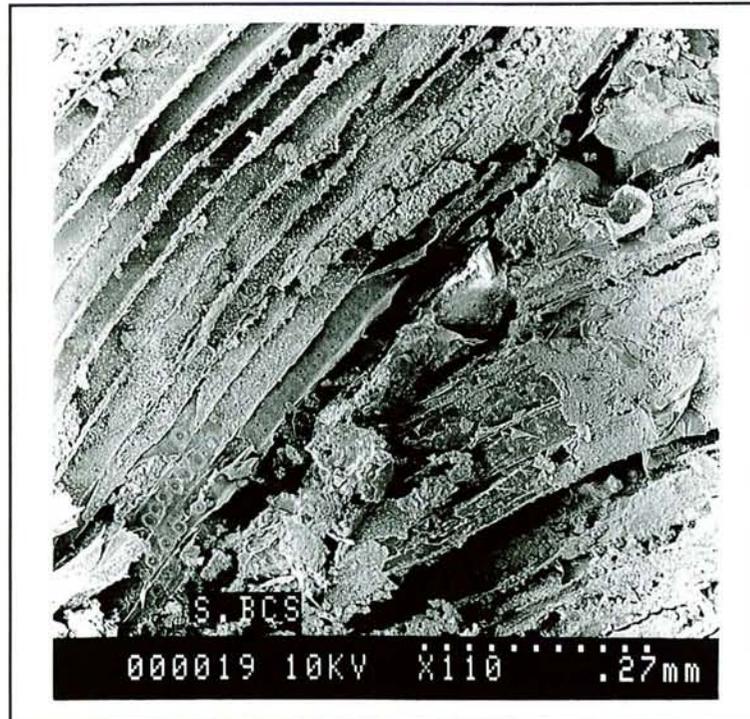
Finalement, il faut tenir compte des conseils de JONES (1967) au sujet des méthodes non destructives : *"les nouveaux initiés sont souvent portés à un optimisme exagéré et qu'ils sont assez déçus lorsque l'amère réalité leur fait découvrir les limites de telles méthodes"*.

ANNEXE V

PHOTOGRAPHIES DES CBC



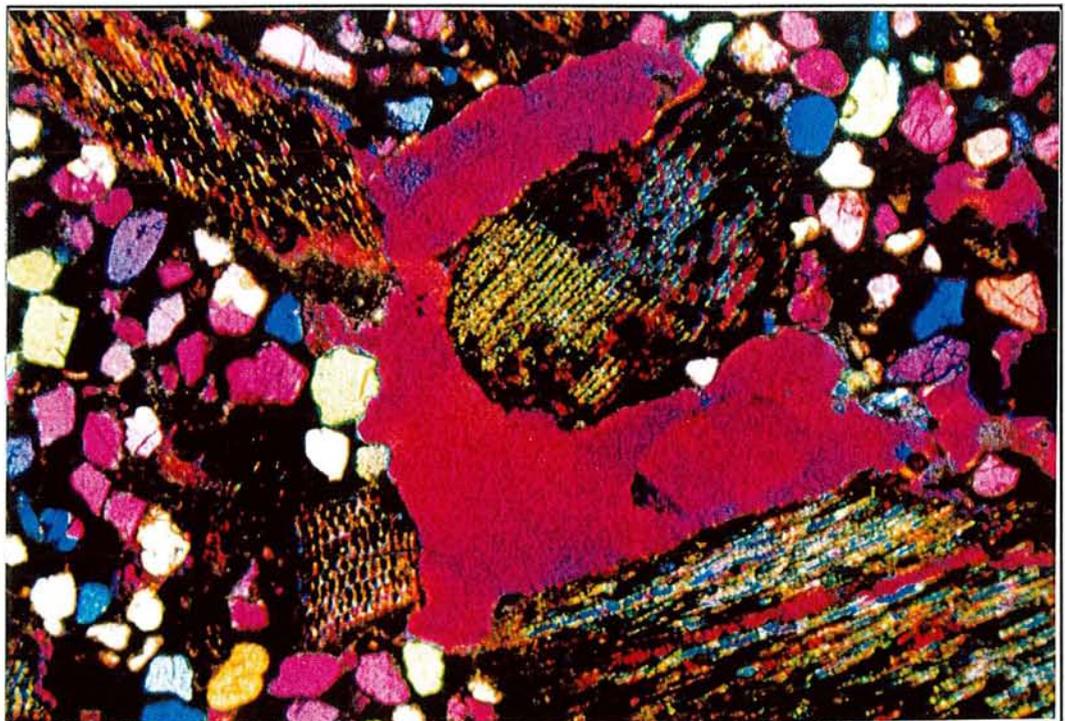
V.1- Sapin traité avec du bitume



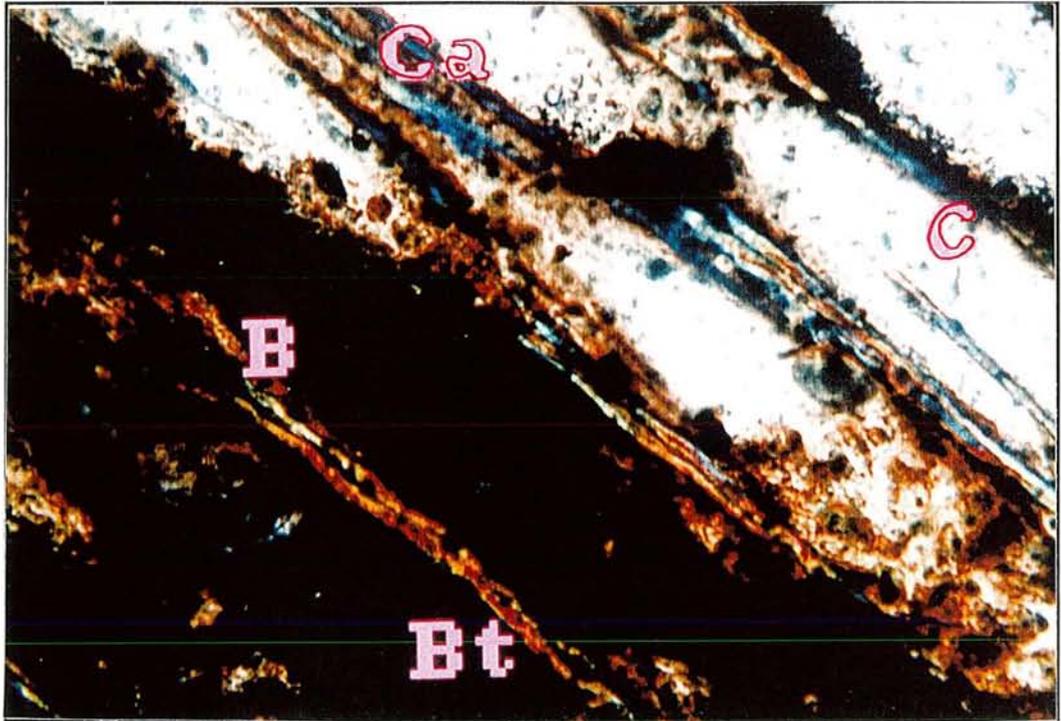
V.2- CBC sapin-ciment



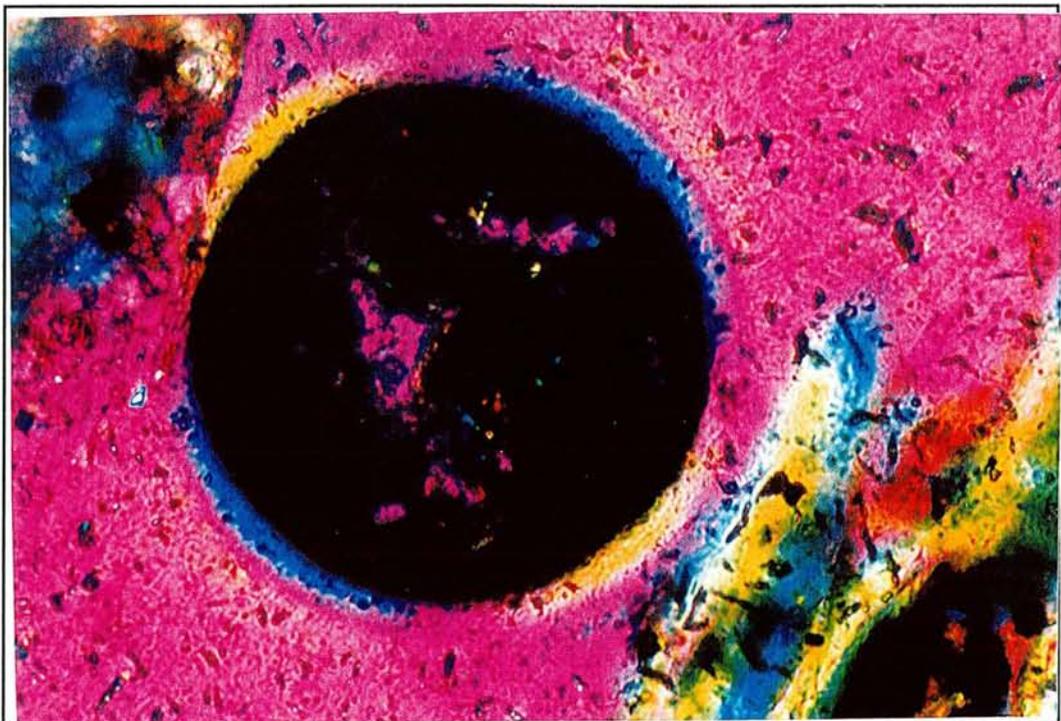
V.3- CBC bambou-ciment (25X)



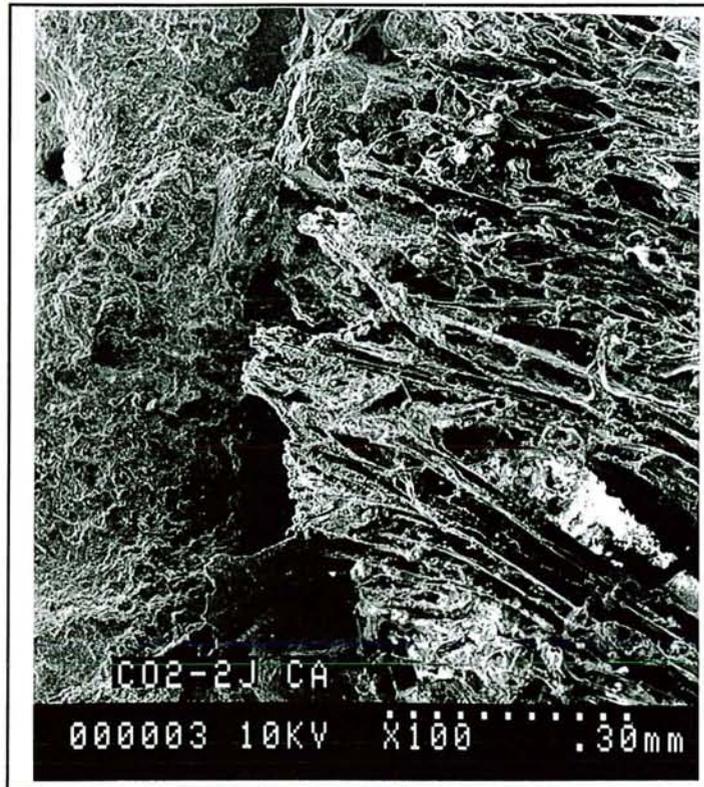
V.4- CBC pin maritime carbonaté (25 X)



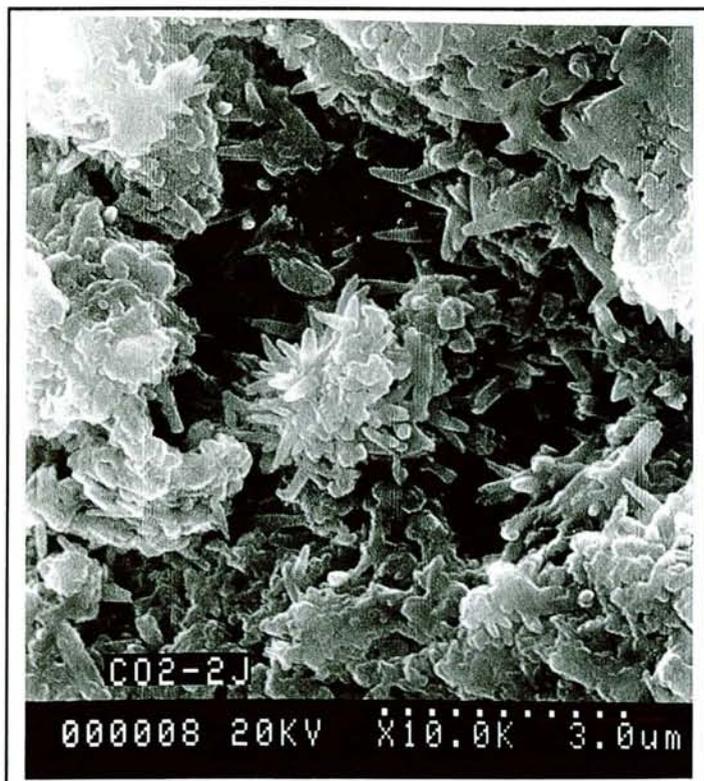
V.5- CBC (100 X). B (Bois), C (Ciment), Bt (Bitume), Ca (Carbonate)



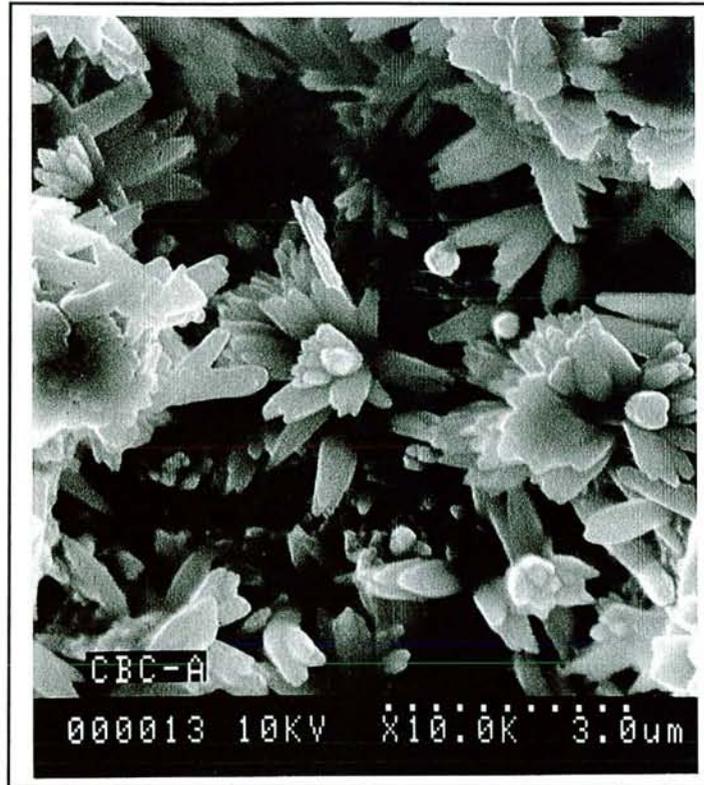
V.6- Présence de carbonate dans un pore (500 X)



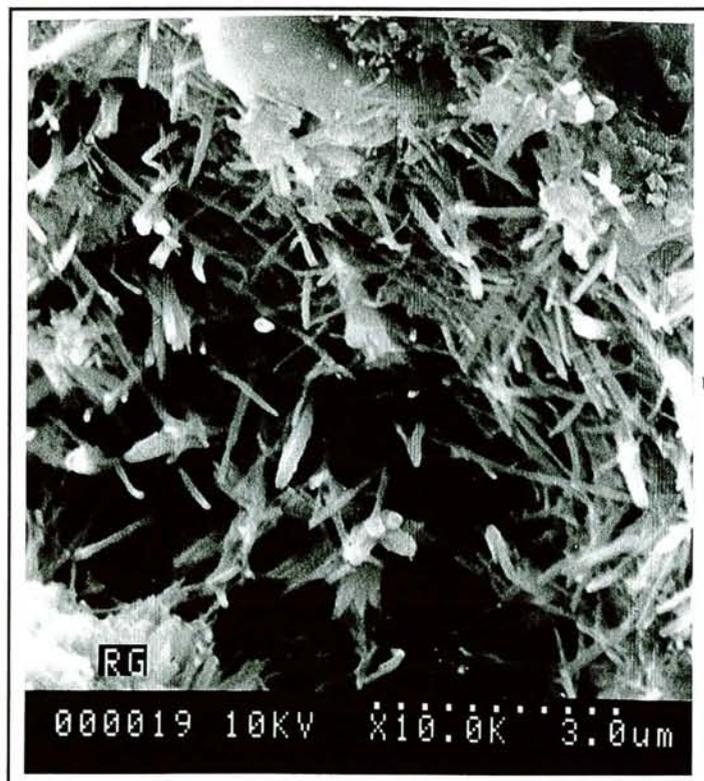
V.7- CBC carbonaté



V.8- CBC carbonaté



V.9- CBC exposé à l'air libre



V.10- CBC après des cycles retrait-gonflement



Nom : **BERALDO**

Prénom : **Antonio Ludovico**

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

en **SCIENCES DU BOIS**

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 6 JUIL. 1994 n° 209

Le Président de l'Université



J.P. FINANCE



RESUME

Le but de notre travail sur les composites biomasse végétale-ciment a été, à la demande des industriels, de satisfaire aux trois paramètres suivants:

- a) masse volumique inférieure à 1200 kg par mètre cube
- b) résistance à l'écrasement supérieure à 4 MegaPascal
- c) variations dimensionnelles, dans les conditions de la norme française, pour les bétons légers inférieures à 1 millimètre par mètre.

Pour se faire nous avons établi un protocole comportant quatre étapes:

- a) élimination des substances inhibitrices à la prise du ciment (lavage à l'eau chaude à 80°C durant 2 heures)
- b) traitement de l'interface des particules de biomasse végétale (10% de bitume pulvérisé)
- c) ajout de substances minérales et/ou de certains additifs à la matrice ciment
- d) cure des éprouvettes à l'issue de leur fabrication (cycles de séchage et d'immersion dans l'eau)

La durée d'atteinte de la stabilité dimensionnelle restant trop grande pour une application industrielle, nous avons cherché à la réduire, soit par des traitements de carbonatation, soit en minimisant la durée des étapes de séchage et d'immersion des éprouvettes. Sans avoir abouti à une solution optimale, nous pensons avoir mis en évidence l'influence des étapes de retrait et d'immersion dans l'eau sur l'atteinte de la stabilité dimensionnelle.

ABSTRACT

Earlier experimental research with a Vosges fir/cement composite produced the following properties:

- a) Density lower than 1200 kg/ cubic meter
- b) Crushing strength higher than 4 MegaPascal
- c) Dimensional variations, within the French Norm, for light concrete, i.e., lower than 1 mm/m.

The research was developed to optimize four phases of the fabrication process:

- a) Elimination of the substances that restrict hydration of the concrete (hot water rinse 80°C-2 hours)
- b) Treatment of the interface vegetal particles (bituminous solution 10%)
- c) Addition of mineral charges and/or cement additives
- d) Cure of specimens after fabrication

The desired period of dimensional stability is taken to be very long to motivate industrial interest. In this way, a time reduction is achieved through the carbonation treatment or to obtain the minimum phases of shrinkage and swelling. The research has show that is not possible to obtain an optimum result, however it is obvious that shrinkage and swelling phase's can be limited to obtain better dimensional stability of the specimens.

RESUMO

O objetivo de nosso trabalho sobre compósitos biomassa vegetal-cimento foi, a pedido de industriais, de satisfazer a três parâmetros seguintes:

- a) massa específica inferior a 1200 kg por metro cúbico
- b) resistência à compressão superior a 4 MegaPascal
- c) variações dimensionais, nas condições da norma francesa, para concreto leve inferiores a 1 mm/m

Para obter esses resultados estabeleceu-se um protocolo experimental comportando quatro etapas:

- a) eliminação das substâncias inibidoras da pega do cimento (lavagem em água a 80°C durante 2 horas)
- b) tratamento da interface das partículas da biomassa vegetal (10% de betume)
- c) Adição de cargas minerais e/ou aditivos
- d) cura das amostras ao fim da fabricação (ciclos de secagem e de umidificação)

O intervalo de tempo necessário para a estabilidade dimensional das amostras sendo muito importante para uma aplicação industrial, buscou-se reduzi-lo, através de tratamento de carbonatação, ou pela minimização das etapas de secagem e de imersão das amostras. Sem obter uma solução ótima, acredita-se que foi evidenciado a influência das etapas de retração e de imersão em água para se atingir a estabilidade dimensional.