

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

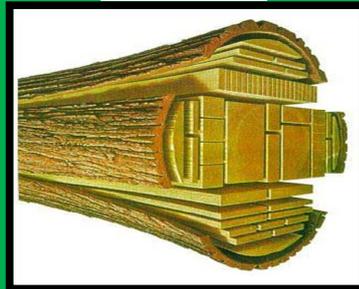
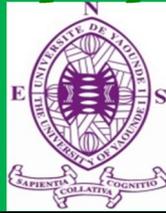
UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DES SCIENCES ET
TECHNOLOGIE DU BOIS

B. P. 47 Yaoundé



LSTB

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER TRAINING COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

LABORATORY OF WOOD SCIENCE AND
TECHNOLOGY

P. O. Box 47 Yaoundé

ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION
DES MATÉRIAUX COMPOSITES À
MATRICE CIMENTAIRE-MÉTAKAOLIN
CHARGÉE DE COPEAUX DE BOIS
(AYOUS ET SAPELLI).

*Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur
des Lycées d'Enseignement Secondaire Général deuxième grade (D.I.P.E.S II)*

Par :

TCHANGOU TCHOKOUAHA Honorine

Licenciée en physique

Matricule 10W1224

Sous la direction de :

Prof. MUKAM FOTSING Joseph Albert

Maître de conférences, Université de Yaoundé I

Année académique 2015-2016

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

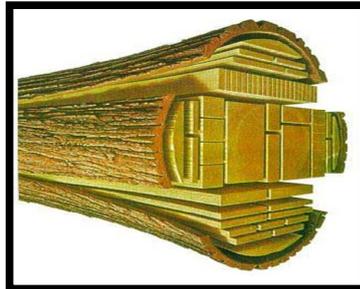
ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DES SCIENCES ET

TECHNOLOGIE DU BOIS

B. P. 47 Yaoundé



LSTB

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER TRAINING COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

LABORATORY OF WOOD SCIENCE AND

TECHNOLOGY

P. O. Box 47 Yaoundé

ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION
DES MATÉRIAUX COMPOSITES À
MATRICE CIMENTAIRE-MÉTAKAOLIN
CHARGÉE DE COPEAUX DE BOIS
(AYOUS ET SAPELLI).

*Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur
des Lycées d'Enseignement Secondaire Général deuxième grade (D.I.P.E.S II)*

Par :

TCHANGOU TCHOKOUAHA Honorine

Licenciée en physique

Matricule 10W1224

Sous la direction de :

Prof. MUKAM FOTSING Joseph Albert

Maître de conférences, Université de Yaoundé I

Année académique 2015-2016

**ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION DES
MATÉRIAUX COMPOSITES À MATRICE
CIMENTAIRE-MÉTAKAOLIN CHARGÉE DE
COPEAUX DE BOIS (AYOUS ET SAPELLI).**

Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du
Diplôme de Professeur des Lycées d'Enseignement Secondaire
Général de deuxième grade (**DI.P.E.S.II**)

par

TCHANGOU TCHOKOUAHA Honorine

Matricule : **10W1224**

Licenciée en physique

Sous la direction de :

Prof. MUKAM FOTSING Joseph Albert

Maître de conférences à l'**U.Y.I**

Année Académique 2015-2016

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire :

À mon père

Papa, tu as tout fait pour que tes enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leur étude ; je te dédie ce travail en témoignage de mon respect et de mon profond amour.

À ma très chère mère

Tu as été pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement. Tu n'as pas cessé de m'encourager et de prier pour moi ; tes prières et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aux familles LEUGA et DJIATCHOUA

Aucun mot, aucune parole ne saurait refléter ce que je ressens pour vous. Depuis ma venue, vous n'avez jamais cessé de prendre soin de moi, de me soutenir et me chérir. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de votre bonté et de votre amour incommensurable.

Puisse le seigneur vous préserver et vous accordez santé, longue vie et bonheur.

À mes grands-frères et soeurs

Vous avez tous été des parents pour moi. Ce travail est le fruit de vos sacrifices et de votre amour.

À ma famille

Votre amour et votre soutien m'ont conduit où je suis.

REMERCIEMENTS

*Merci à Dieu tout puissant, qui prend soin de nous jour après jour ; et nous guide dans le droit chemin. **Sans toi, rien de tout ceci ne serait possible !***

Sincères remerciements à Messieurs **AWONO ONANA Charles** et **MAMBA**, respectivement Directeur et Chef du Département de génie civil de l'E.N.S.P de m'avoir permis de travailler au laboratoire de géotechnique et matériaux.

Je remercie le **Pr. Gabriel Nicolas ANDJIGA** et le **Pr. BEGUIDE BONOMA** respectivement Directeur et Chef du département de Physique à l'E.N.S ; tous les enseignants et tout le personnel administratif ou d'appui pour le bon suivi des étudiants.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude au **Prof. MUKAM FOTSING Joseph Albert** qui a bien voulu m'encadrer et dont l'aide et l'assistance ont été nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Merci pour votre confiance.

J'exprime ma reconnaissance au **Dr. CHEUMANI YONA Arnaud Maxime** qui a bien voulu me conseiller durant le processus d'élaboration de ce travail et dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne m'ont jamais fait défaut.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, qui me font l'honneur d'évaluer ce mémoire.

Je tiens également à faire un clin d'oeil à mes collègues et amis : **DEUMI, KOUNCHIE, SIEWE, SILATCHOM, TCHANA, TIETCHOU, ZEBAZE...**, pour les encouragements et les moments de fou-rires passés ensemble.

Je ne saurais oublier Messieurs **GNINTEDEM** et **KUETE** ainsi que tous les collègues du laboratoire des sciences et technologie du bois à l'E.N.S et ceux du laboratoire de chimie macromoléculaire à l'U.Y.I.

Une pensée particulière à ceux qui m'ont quitté et dont le souvenir me pousse à aller de l'avant.

Table des matières

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	viii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 REVUE DE LITTÉRATURE	4
1.1 Le ciment	4
1.1.1 Définition	4
1.1.2 La fabrication du ciment	5
1.1.3 Classification des ciments	6
1.1.4 Hydratation d'un ciment Portland	8
1.2 Le métakaolin	9
1.2.1 Définition	9
1.2.2 L'argile	10
1.3 Les copeaux de bois	10
1.3.1 Généralités	10

1.3.2	Propriétés du bois	12
1.4	Matériaux composites	13
1.4.1	Généralités	13
1.4.2	État de l'art du matériau de l'étude	15
1.4.3	Applications	17
1.5	Généralités sur la caractérisation d'un matériau	18
1.5.1	Techniques de caractérisation	18
1.5.2	Principe de quelques essais mécaniques	19
2	MATÉRIEL ET MÉTHODES	23
2.1	Caractérisations des matières premières	23
2.1.1	Le ciment	23
2.1.2	Argile kaolinitique	24
2.1.3	L'Ayous	25
2.1.4	Le Sapelli	26
2.1.5	Les additifs	27
2.2	Conditionnement des matières premières	28
2.3	Procédure d'élaboration des matériaux composites	30
2.4	Caractérisations mécaniques	35
2.4.1	Test de flexion trois points	36
2.4.2	Test de compression uniaxiale	36
2.5	Caractérisations physico-chimiques	37
2.5.1	Absorption d'eau par immersion sous pression atmosphérique	37
2.5.2	Test de vieillissement	38
3	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	40
3.1	Présentation des matériaux composites élaborés	40
3.2	Étude du comportement mécanique	41
3.2.1	Comportements mécaniques au jeune âge(7 jours)	41
3.2.2	Comportements mécaniques à 28 jours	43
3.3	Effet du vieillissement accéléré	45
3.3.1	Effet sur la masse volumique	46

3.3.2	Effet sur la résistance en compression	47
3.3.3	Effet sur la résistance en flexion trois points	48
3.4	Étude de l’immersion sous pression atmosphérique	49
3.4.1	Coefficient d’absorption d’eau	50
4	IMPLICATIONS DANS LE SYSTÈME ÉDUCATIF	52
4.1	Intérêt didactique	52
4.2	Fiche pédagogique	53
4.3	Fiche-élève	54
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	59
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61

RÉSUMÉ

Cette étude présente l'effet d'incorporer le métakaolin(MK) sur les propriétés mécaniques et physiques des composites bois-ciment. Le métakaolin est ajouté à différents pourcentages dans une matrice cimentaire. Nous nous sommes intéressés particulièrement à la comparaison entre les caractéristiques des composites à matrice cimentaire pure et ceux à matrice composée. Les résultats montrent que, l'incorporation du métakaolin dans le composite bois-ciment diminue sa masse volumique, ses résistances(compression, flexion) et augmente son coefficient d'absorption. Pour un taux de remplacement de 20%, les composites à base d'Ayous(*Triplochiton Scleroxylon*) présentent des caractéristiques proches du composite à matrice pure. D'autre part, un phénomène d'incompatibilité du Sapelli(*Entandrophragma Cylindricum*) avec le métakaolin est observé.

Mots clés : copeaux de bois, ciment, métakaolin, résistance mécanique, composites.

ABSTRACT

This study presents the effect of incorporating metakaolin(MK) on mechanical and physical properties of wood-cement composites. The metakaolin was added to different percentages in cement matrix. We compared composites of pure cement matrix and those with metakaolin modified-cement matrix. The results showed that, addition of metakaolin in wood-cement composites reduced globally the density, the strength(compression, bending) and increased the absorption coefficient. For a rate of 20%, composites contains Ayous(*Triplochiton Scleroxylon*) presented characteristics close to the rate of 0 %. On the other hand, a phenomenon of incompatibility of Sapelli(*Entandrophragma Cylindricum*) with metakaolin was observed.

keys words : Wood chips, cement, metakaolin, mechanical resistance, composites.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

MK : Métakaolin

CBC : Composites bois-ciment

CBCA : Composite bois-ciment-argile

AC : Ayous-ciment

SC : Sapelli-ciment

ACA : Ayous-ciment-argile

SCA : Sapelli-ciment-argile

CV : Composites ayant suivi le cycle de vieillissement

CNV : Composites n'ayant pas suivi le cycle de vieillissement

Table des figures

1.1	Étapes de la fabrication du ciment.	6
1.2	Coupe transversale d'un tronc d'arbre.	11
1.3	Matériau composite.	13
1.4	Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.	20
1.5	Courbe contrainte-déformation : 1)matériau fragile; 2) matériau ductile.	21
1.6	Essai de compression.	21
2.1	Sac de ciment de marque CIMENCAM 42,5R.	24
2.2	Copeaux de Sapelli.	26
2.3	(a) Hydroxyde de sodium (b) Carbonate de calcium.	28
2.4	(a) Broyeur à lame; Copeaux réduits : (b) Ayous (c) Sapelli.	29
2.5	Four de marque Nabertherm.	29
2.6	Balance Sartorius et éprouvette graduée de 1000 mL.	31
2.7	Malaxeur de marque Perrier.	32
2.8	Étapes du malaxage.	32
2.9	Malaxage des additifs et du métakaolin.	33
2.10	Moule lubrifié.	33
2.11	Moulage des matériaux.	34

2.12	Conservation des éprouvettes moulées.	35
2.13	Démoulage des éprouvettes.	35
2.14	Dispositif expérimental de l'essai de flexion.	36
2.15	Dispositif expérimental de l'essai de compression.	37
2.16	Dispositif expérimental de l'absorption d'eau par immersion	38
3.1	Éprouvettes élaborées.	40
3.2	Résistances en compression à 7 jours.	41
3.3	Résistance en flexion trois points à 7 jours.	42
3.4	Caractéristiques des matériaux à 28 jours.	43
3.5	Caractéristiques des matériaux vieillies.	46
3.6	Masse volumique des variantes vieillies.	46
3.7	Résistance en compression des variantes vieillies.	47
3.8	Résistance en flexion trois points des variantes vieillies.	48
3.9	Volume de l'eau absorbée en fonction du temps.	49
3.10	Coefficient d'absorption de quelques variantes.	51
4.1	Matériau composite.	56

Liste des tableaux

1.1	Type de ciment et composition.	7
1.2	Classe de résistance du ciment.	8
2.1	Composition chimique du kaolin[Douwe 2014].	25
2.2	Caractéristiques des additifs.	28
2.3	Formulations des matériaux.	31
3.1	Résistances à 7 jours.	41
3.2	Résistances à 28 jours.	43
3.3	Résistances des matériaux vieillis.	45
3.4	Volume d'eau absorbée.	49
3.5	Coefficient d'absorption d'eau par immersion.	50

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie automobile, les bâtiments et travaux publics (BTP), l'aérospatial ou encore la médecine. Les nouveaux composites utilisables dans l'industrie de la construction doivent allier performances mécaniques et liberté architecturale tout en diminuant l'impact environnemental lors du processus de transformation [G. Promis & al. 2009]. Le ciment Portland est l'un des matériaux les plus utilisés au monde; il sert de liant ou de matrice dans de nombreux composites : bétons traditionnels aux bétons hautes performances, mortiers, panneaux de fibres, panneaux de particules de bois. Toutefois, le ciment Portland a une contribution importante à la pollution environnementale tant décriée. La fabrication d'une tonne de ciment libère près d'une tonne de CO_2 (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère; et sa production est responsable d'environ 5% des émissions de CO_2 de la planète.

C'est dans ce contexte, que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux composites à base de métakaolin utilisant des ressources abondantes (copeaux de bois). L'incorporation des copeaux de bois contribue à valoriser les sous-produits du bois.

Des systèmes constitués de ciment Portland partiellement substitué par d'autres matériaux ayant une activité pouzzolanique ont investi la littérature. De nouveaux liants complètement différents tels que les géopolymères sont également

en développement. Les différents systèmes sont envisagés pas seulement pour réduire la pollution, mais aussi pour la production des matériaux aux performances améliorées : résistances mécaniques, faible imperméabilité et retrait, résistance à l'efflorescence.

L'objectif de ce travail est l'élaboration et la caractérisation des composites à matrice cimentaire-métakaolin chargée par les copeaux de bois (Ayous et Sapelli). Plus précisément ma démarche repose sur la substitution du ciment par le métakaolin à différents pourcentages afin d'en déterminer les caractéristiques (mécanique et physique) et d'observer les modifications engendrées sur le vieillissement de tels composites.

À faible dose, le métakaolin réagit positivement avec le ciment qui joue alors le rôle d'activateur interne. Le métakaolin à forte dose retarde le durcissement du matériau. Un mélange de NaOH et de $CaCO_3$ est utilisé comme activateur externe du métakaolin à partir d'un taux de remplacement de 50%.

L'Ayous et le Sapelli sont choisis pour leur densité (respectivement faible et élevée) et leur compatibilité avec le ciment. Des raisons de disponibilité et de coût ont aussi encouragé ce choix.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le chapitre I essentiellement bibliographique présente les généralités sur les produits entrant dans la composition de nos matériaux. Un état de l'art des matériaux utilisant ces produits est dressé. Le principe des essais mécaniques à réaliser boucle ce chapitre ;
- Le chapitre II se rapporte aux matériels et méthodes expérimentales ;
- Le chapitre III : Les résultats obtenus lors des différents tests y sont présentés et discutés ;
- Le chapitre IV donne l'implication de cette étude sur le système éducatif.

Le mémoire se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et une présentation des perspectives à envisager lors d'étude complémentaires.

REVUE DE LITTÉRATURE

L'analyse des données générales sur les matériaux composites bois-ciment montre à la fois leur importance historique et leur intérêt aussi bien technologique que scientifique. Ces matériaux qui n'ont pas livré tous leurs secrets, sont encore potentiellement améliorables. L'objectif de ce chapitre est de présenter des généralités qui permettront aux personnes étrangères au monde des matériaux composites cimentaires d'acquérir le vocabulaire et les notions de base sur ces matériaux. Cela passe évidemment par une étude des constituants (ciment et bois) et du métakaolin qui est l'élément destiné à améliorer les propriétés du matériau. Des généralités sur la caractérisation des matériaux bouclent ce chapitre.

1.1 Le ciment

1.1.1 Définition

Le ciment (du latin *caementum*, signifiant moellon, pierre de construction) est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite de réactions et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [S.castinaud 2000].

Le ciment Portland est actuellement le ciment le plus utilisé au monde. Les travaux effectués ont montré que les principaux composés du ciment portland sont

[Andriamananstilavo.N 2003] :

- Le Silicate Tricalcique (Alite) : $3CaO.SiO_2$ (C3S) ;
- Le Silicate Bicalcique (Belite) : $2CaO.SiO_2$ (C2S) ;
- L'Aluminate Tricalcique : $3CaO.Al_2O_3$ (C3A) ;
- L'Alumino-Ferrite Tétracalcique : $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (C4AF) ;
- Le gypse(sulfate de calcium hydraté).

1.1.2 La fabrication du ciment

Le ciment Portland est produit à partir des roches facilement accessibles : calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant environ 80% de calcaire et 20% d'argile. Le mélange, finement broyé (cru), est porté à 1450°C dans un four rotatif (1h environ), puis brusquement refroidit pour produire le clinker (granules). Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5%) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland ordinaire. Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant d'autres constituants tels que la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau, le calcaire, les cendres volantes...[Cours ciments et bétons 2015]

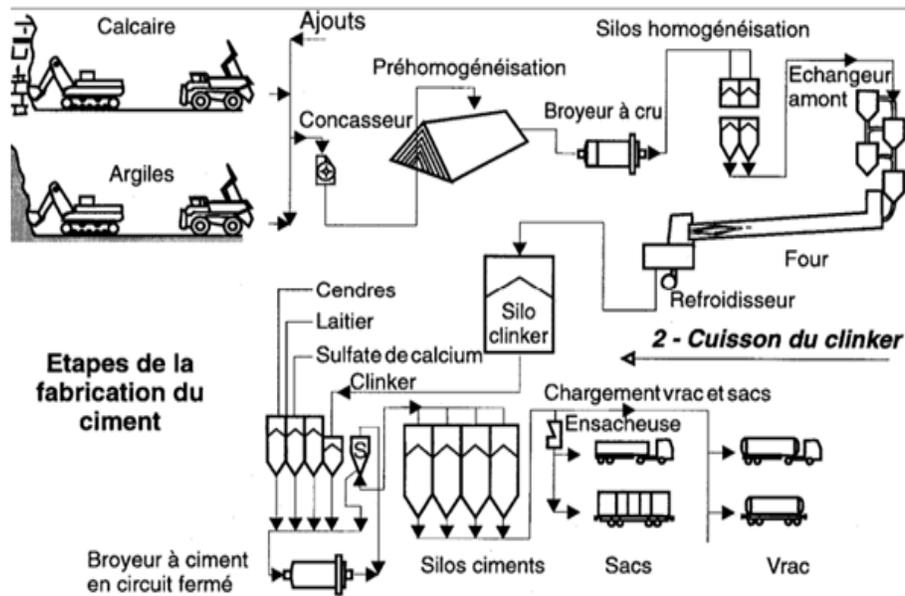


FIGURE 1.1 – Étapes de la fabrication du ciment.

1.1.3 Classification des ciments

Classification en fonction de la composition

La norme européenne NF 197-1[NF EN 197-1. 2000] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq grandes familles. Les familles sont numérotées de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse).

- **CEM I** : Ciment portland (CPA) ;
- **CEM II** : Ciment portland composé (CPJ) ;
- **CEM III** : Ciment de haut fourneau (CHF) ;
- **CEM IV** : Ciment pouzzolanique (CPZ) ;
- **CEM V** : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

TABLE 1.1 – Type de ciment et composition.

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Classification en fonction de la résistance en compression

La norme européenne NF EN 196-1 [NF EN 196-1. 2000] classe les ciments courants d'après leur résistance à la compression à 28 jours (**Tableau 1.2**). Des lettres **R** et **N** sont associées aux ciments dont les résistances au jeune âge sont respectivement élevées et ordinaires.

TABLE 1.2 – Classe de résistance du ciment.

Classe de résistance	Résistance à la compression				Temps de début de prise min	Stabilité (expansion) mm
	MPa					
	Résistance à court terme		Résistance courante			
2 jours	7 jours	28 jours				
32,5 N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	—				
42,5 N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	—				
52,5 N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	—				

1.1.4 Hydratation d'un ciment Portland

L'eau de gâchage [NF EN 1008]

Elle assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du matériau à former, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure et la cinétique d'hydratation.

Processus d'hydratation

Une fois la poudre de ciment mélangé à l'eau, les réactions d'hydratation se développent. Ces constituants anhydres (C3S, C2S, C3A, C4AF) donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi qu'à de la chaux hydratée (portlandite). Les aluminates qui s'hydratent plus rapidement, forment des cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées, à l'origine du phénomène dit de « prise ». Et les silicates s'hydratent plus lentement en déve-

loppant une phase de silicate de calcium hydratée responsable de l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci, est une véritable roche artificielle qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures. Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives[Cimbéton 2005].

- **Phase dormante** : La pâte de ciment (ciment + eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du ciment et la température). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais elles sont ralenties par la présence du gypse ;
- **Début et fin de prise** : Après une à deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : C'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide ;
- **Durcissement** : Le durcissement est la période qui suit la prise et pendant laquelle le système ciment-eau se transforme en une masse solide résistant aux efforts mécaniques. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

1.2 Le métakaolin

1.2.1 Définition

Le métakaolin est un matériau pouzzolanique. Il est obtenu par calcination de l'argile de kaolin à des températures de 700°C à 800 °C. Le kaolin est un matériau naturel composé principalement de silice(SiO_2) et d'alumine(Al_2O_3). Il contient

aussi les éléments : Mn, Fe, Ca, K, Na...

1.2.2 L'argile

Le terme argile vient du grec Argilos dont la racine Argos signifie blanc. L'argile est une roche sédimentaire, souvent meuble (glaise), qui, imbibée d'eau, peut former une pâte plus ou moins plastique pouvant être façonnée et durcissant à la cuisson. Pour les géologues, l'argile est une roche meuble, de dureté très faible, constituée de minéraux argileux accompagnés d'impuretés qui lui donnent des couleurs variées. Grasse au toucher, elle est avide d'eau, imperméable. Lorsqu'elle se dessèche, elle diminue de volume et acquiert une certaine dureté. La plus grande partie des argiles est d'origine sédimentaire. L'altération des roches cristallines ou la reprise d'anciens sédiments argileux produisent des minéraux argileux qui sont transportés par les cours d'eau et déposés dans les zones de sédimentation, sous forme de vases. Celles-ci sont ensuite compactées sous l'effet de la diagenèse. Mais il existe également des argiles néoformées dans les océans ou liées à une activité hydrothermale. D'un point de vue minéral, les argiles sont des minéraux aluminosilicatés dont la dimension est inférieure à $2\ \mu\text{m}$ [M.Le Troedec 2009].

1.3 Les copeaux de bois

1.3.1 Généralités

Le bois est une ressource naturelle renouvelable produit par l'arbre au cours de sa croissance. Comme la plupart des matériaux naturels, le bois est un matériau hétérogène ; Ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et biologiques varient extrêmement d'une espèce à l'autre. Les différences de comportements existent également à l'intérieur d'une même espèce, d'un même peuplement et d'un même

arbre [Roux & al. 1994].

Les copeaux de bois quant à eux désignent l'ensemble des résidus produits par le sciage de bois. Les copeaux sont produits au cours d'opérations d'usinage effectuées sur la matière première (bois). Les copeaux résultants d'une manufacture peuvent être ainsi récupérés et valorisés pour le domaine de la construction [Djoudi & al. 2007].

Observations macroscopiques

La coupe transversale d'un tronc d'arbre révèle plusieurs éléments de la périphérie vers le centre, comme le montre la **Figure 1.1** [L. Bigorgne 2011] : L'écorce, le cambium, l'aubier et le duramen ou bois de cœur. L'aubier et le duramen constituent le bois.

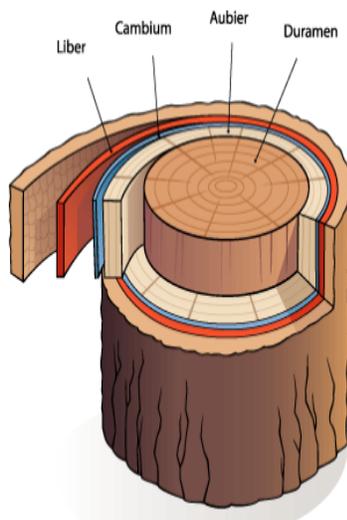


FIGURE 1.2 – Coupe transversale d'un tronc d'arbre.

Composition chimique du bois

Le bois est constitué principalement de fibrilles de cellulose (50%), de lignine (20 à 30 %) et d'hémicellulose (15 à 25 %)[Cheumani 2009]. Il contient également en plus faible quantité des substances extractibles, des matières minérales

et une part d'humidité variable.

1.3.2 Propriétés du bois

- Les propriétés mécaniques du bois : Elles caractérisent la rigidité et la résistance du bois face aux forces qui tendent à le déformer. En effet, le bois est un solide déformable qui réagit à l'application des charges en se déformant sous leurs effets. Le bois a cependant une meilleure résistance à la traction qu'à la compression.

L'élasticité est la propriété qu'ont certains matériaux comme le bois de reprendre leur forme ou leurs dimensions initiales lorsque la charge causant la déformation est enlevée. Ceci a lieu lorsque qu'on est en dessous de la limite proportionnelle ou élastique. Autrement, une partie de la déformation sera permanente, même après enlèvement de la charge. Les propriétés mécaniques du bois sont sensibles à la variation de son état physique.[**Mohssine & Fafard 2005**]

- **Densité** : La densité du bois est généralement inférieure à 1 (le bois flotte) en raison des vides dans sa structure ;
- **Hygroscopie** : Pour le bois, il s'agit généralement de taux d'humidité noté H%, dite humidité sur sec (par rapport au bois anhydre) ;
- **Durabilité** : Bien qu'il s'agisse d'un matériau biodégradable, le bois peut durer dans certaines conditions plusieurs siècles, comme en témoignent de nombreuses charpentes de monuments anciens. Les paramètres favorables à la durabilité du bois sont le maintien en atmosphère sèche, la densité élevée, la composition chimique, la période de coupe, liée à l'essence (présence de résines, d'oléo-résines, de tanins) ;
- **Propriétés isolantes** : Du fait de sa structure cellulaire, qui emprisonne de

l'air sous forme de petits volumes, le bois est un mauvais conducteur de la chaleur. Cependant sa conductibilité thermique est très variable en fonction de son degré d'humidité, de sa densité et de l'essence considérée, ainsi que de l'orientation par rapport au fil du bois .

1.4 Matériaux composites

1.4.1 Généralités

Les matériaux composites sont constitués de l'assemblage d'au moins deux composants non miscibles et de natures différentes, se complétant et permettant d'obtenir des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possède. [Berthelot.D 1996]

Ils sont constitués d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est appelée matrice (ou liant) et la phase discontinue, qui présente usuellement des propriétés mécaniques (rigidités et résistances) supérieures à celle de la matrice, est nommée renfort (**Figure 1.2**)[Mustapha.M 2013]. La phase discontinue peut jouer le rôle de charge (n'améliore pas les propriétés mécaniques).

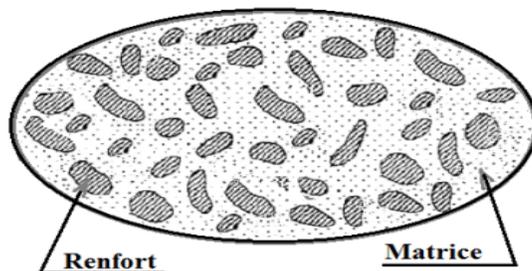


FIGURE 1.3 – Matériau composite.

Le mélange de ces deux phases conduit à de nouveaux matériaux qui sont

hétérogènes et généralement anisotropes.

La matrice

Les matrices ont essentiellement pour rôle de lier le renfort ou la charge, de transférer les contraintes imposées sur le matériau aux renforts(fibre), de les protéger contre les agressions extérieures et de donner la forme finale du matériau. Elles doivent être en outre assez déformable et présenter une certaine compatibilité avec le renfort ou la charge. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques spécifiques élevées, la matrice doit posséder une bonne affinité aux fibres et une masse volumique faible. Il existe plusieurs types de matrices, qui peuvent être classées en matrices organiques (thermoplastiques ou thermodurcissables), minérales et métalliques. Les matrices (ciment et argile) qui font l'objet de notre étude sont des matrices minérales.

Le renfort ou la charge

Le renfort qui joue le rôle de squelette ou d'armature, assure la bonne tenue mécanique de ces matériaux. Il se présente généralement sous la forme de fibres, dont la conception de l'orientation au sein du composite dépend principalement de la direction du chargement mécanique à supporter. Les caractéristiques recherchées pour les fibres sont : la rigidité et la résistance mécanique élevée. Ces fibres peuvent provenir de plusieurs sources(plantes, animaux , minéraux, synthétiques, ...).

La charge quant à elle, permet de réduire les coûts de production et d'améliorer des propriétés autre que les propriétés mécaniques.

1.4.2 État de l'art du matériau de l'étude

L'introduction des matières végétales pour le renforcement est une technique très ancienne. En effet, nos prédécesseurs utilisaient de la paille pour renforcer l'argile, et le crin (poils de chevaux) pour renforcer de nombreux mortiers et du plâtre [T.S.R Ayyar 1976]. Les nouveaux composites utilisables dans l'industrie de la construction doivent allier performances mécaniques et liberté architecturale tout en diminuant l'impact environnemental lors du processus de transformation. Les composites à matrice minérale constituent une solution envisageable afin de répondre à ces critères . Par conséquent, des informations détaillées sont nécessaires pour la conception de structures à base de ces matériaux [G. Promis & al. 2009].

La formulation d'un mélange qui pourrait être une alternative au ciment Portland ordinaire est l'objet de plusieurs études. La substitution d'une fraction de ce ciment par d'autres produits contenant de la silice et/ou de l'alumine est étudiée. Des travaux sont également menés sur l'amélioration des propriétés des ciments ainsi formés.

H.A. Abdel-Gawwad & al. 2014 ont élaboré un ciment en poudre par mélange du laitier granulé avec un activateur sec constitué d'hydroxyde de sodium(NaOH) et du carbonate de calcium($CaCO_3$). Ils estiment que la concentration optimale de 4% pour le NaOH et de 5% pour le $CaCO_3$ en masse du laitier donne la plus haute propriété physico-mécanique.

Banthia & Yan 1996 ont trouvé que le métakaolin est très efficace dans l'amélioration de l'adhérence entre les fibres d'acier et pâte du ciment de fumées de silice.

P. Dinakar & al. 2013 ont observé que 10% de remplacement du ciment par le métakaolin a été le niveau optimal en termes de résistance à la compression.

Au-delà de 10% de remplacement, la résistance a diminué mais est restée supérieure comparée au béton témoin. Dans des essais de durabilité, les bétons faits de métakaolin ont manifesté une grande résistance et cette dernière croît avec le pourcentage d'ajout de métakaolin.

Fertikh .S & al. 2011 ont montré que le phénomène d'incompatibilité des fibres de Diss ne se pose pas avec des matrices argileuses mais plutôt avec des matrices cimentaires. Ce phénomène se manifeste par un retard dans la prise qui affecte le durcissement du composite. Pour palier à cet effet inhibiteur, les fibres ont subi un traitement thermique.

Silva F.L & al. 2010 ont étudié le comportement mécanique de composites à longues feuilles de sisal à matrices cimentaires ordinaires ou améliorées par le remplacement de 50% de ciment par de l'argile calcinée. Ils ont trouvé que les composites à matrices améliorées ont donné des résistances ultimes à la traction et des déformations plus importantes que les composites à matrices cimentaires, aussi bien en traction directe qu'en flexion.

Khelifi & Belouettar 2012 ont montré qu'une tentative de traitement des copeaux de bois n'a pas amélioré considérablement les caractéristiques du béton de leur étude, notamment la résistance mécanique en compression et en traction par flexion. Mais ils relèvent que des copeaux de bois traités présentent des résistances mécaniques acceptables par rapport à celles des copeaux non traités parce que le traitement des copeaux rend la structure du matériaux plus homogène et améliore l'adhérence bois-matrice.

L'incorporation des résidus de bois dans le bétons légers diminue sa densité et sa résistance mécanique à la compression, augmente son pouvoir hydrique. D'autre part, à pourcentage égal, les bétons élaborés à partir des copeaux présentent des densités et des résistances en compression supérieures à ceux obtenues à partir de

la sciure [D.Taoukil & al. 2011].

Ouattara S. 2013 élabore des briques légères à partir d'argile, de ciment et de sciure de bois. Les résultats montrent un allègement de l'ordre de 42 % pour une teneur en sciure de bois de 25 %. Une légère augmentation de la résistance à la flexion entre 0 et 20 % de sciure de bois. La résistance à la compression, quant à elle, varie fortement entre 0 et 25 % de sciure de bois avec une valeur maximale de 4,47 MPa à 15 %. L'usure par abrasion des composites baisse aussi jusqu'à 15 % de sciure de bois.

1.4.3 Applications

Les matériaux composites offrent d'excellents rapports masse/rigidité/résistance en comparaison avec les matériaux métalliques. Ils répondent parfaitement aux exigences mécaniques, thermiques, acoustiques, transparence, résistance aux feux et fatigue . Par conséquent, plusieurs secteurs utilisent actuellement les matériaux composites, comme le secteur aérospatial et aéronautique, où la légèreté des structures est un facteur stratégique. De même, grâce à leurs propriétés mécaniques spécifiques nettement supérieures à celles des matériaux plus usuels tels que l'acier ou l'aluminium, les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), le domaine maritime et ferroviaire, le bâtiment ainsi que les sports et loisirs. Le secteur automobile s'est y également investis.

1.5 Généralités sur la caractérisation d'un matériau

1.5.1 Techniques de caractérisation

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. Il existe de nombreuses techniques de caractérisation des matériaux qui reposent sur différents principes physiques de base : les interactions rayonnement-matière, la thermodynamique et la mécanique.

- **Essais mécaniques** : Ils sont les plus couramment utilisés en production car ils permettent d'avoir des données sur les propriétés mécaniques, rapidement avec des appareils de mesure relativement simples. Les principaux essais mécaniques sont : traction, compression, dureté, élasticité, résilience, fatigue, analyse mécanique dynamique (DMA) ;
- **Analyses physico-chimiques**
 - ★ Interaction rayonnement-matière : Microscopie (microscopie électronique à balayage (MEB), microscopie électronique en transmission (MET), microscope optique), rayons X, rayon de neutrons ;
 - ★ Analyse thermique : calorimétrie différentielle à balayage (DSC), analyse thermogravimétrique (ATG) et analyse thermomécanique (TMA).
- **Essais non destructifs** : La plupart des techniques de caractérisation sont dites destructives car le matériau est endommagé à l'issue du test. Il existe par ailleurs des techniques de contrôle dites non destructives, qui ne dégradent pas le matériau. Grâce à ces méthodes, on peut, par exemple, tester la qualité mécanique (absence de fissuration et corrosion) de chaque pièce à l'issue de la production de pièces ou lors de leur vérification en maintenance.
- **Essais de durabilité** [L. Bigorgne 2011]
 - ★ **Essais vis-à-vis de la corrosion des armatures** : Essai de porosité

et de masse volumique, perméabilité au gaz, Coefficient de diffusion apparent des chlorures, mesure de la résistivité électrique.

★ **Essais vis-à-vis des risques de gonflement** : Il s'agit de l'essai de performance qui dépend de la norme suivie.

★ **Essais vis-à-vis des effets du gel** : Mesure de l'air occlus, mesure du facteur d'espacement, mesure de la masse écaillée sous facteurs agressifs (écaillage), Mesure de la résistance à la compression ...

De plus d'autres essais ou analyses permettent une meilleure connaissance du composite : Vieillessement(absorption d'eau, tenue en température,...), dilatation thermique, etc.

1.5.2 Principe de quelques essais mécaniques

Toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques (limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc). La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite et sa structure permettent de comprendre, voir de prédire son comportement en service[Zaidi A. 2014].

Essai de flexion trois points

Les essais de flexion monotone sont réalisés suivant des normes ; ces essais sont largement utilisés en raison de leur simplicité. Il existe plusieurs types d'essais de flexion(trois points, quatre points, cinq points, par flambement..), l'essai proposé dans cette étude est l'essai de flexion trois points.

Les essais de flexion trois points (Figure 1.) sont réalisés suivant les recommandations de la norme française NFT57-104 et 105. Ils présentent l'avantage

d'utiliser des éprouvettes de conception simple avec des barreaux prismatiques de section rectangulaire [Reynaud & Gérard 1997]. Le principe de cet essai est de déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'une panne située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante, dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux telles que le module de Young et la résistance en flexion, la flèche maximale. On enregistre la courbe contrainte-déformation.

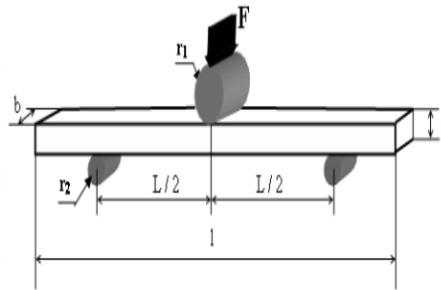


FIGURE 1.4 – Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.

Avec

- F : charge appliquée ;
- r_1 : rayon de cylindre de la panne(5 mm) ;
- r_2 : rayon des cylindres d'appuis(5 mm) ;
- L : longueur entre les appuis ;
- l : longueur totale de l'éprouvette ;
- h : hauteur de l'éprouvette ;
- b : largeur de l'éprouvette.

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, une face de l'éprouvette soumise à une contrainte de traction et l'autre à une contrainte de compression. Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement, sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre ; Et en fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai,

il y'a compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement, et la courbe de contrainte-déformation est donnée par la **Figure 1.5**

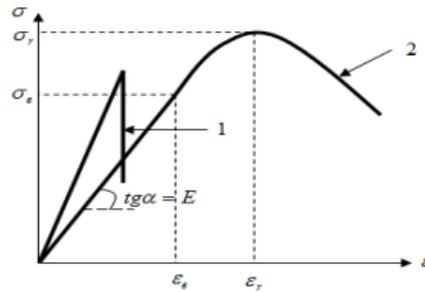


FIGURE 1.5 – Courbe contrainte-déformation : 1)matériau fragile ; 2) matériau ductile.

La contrainte normale σ_f est donnée par la relation :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1.1)$$

Essai de compression

L'essai consiste à appliquer à vitesse constante un effort de compression sur un échantillon cubique ou cylindrique. Il détermine la contrainte à la rupture en compression. Mais pour cet essai, la résistance du matériau composite unidirectionnel dépend de multiples facteurs tels que la charge/renfort, la matrice, la résistance interfaciale et le taux de vide [Zaidi A. 2014].

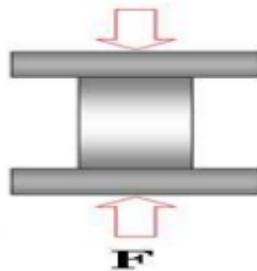


FIGURE 1.6 – Essai de compression.

Fr : Charge à la rupture ;

S : Surface de contact entre l'éprouvette et les plateaux de la presse.

Cet essai détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la formule :

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S} \quad (1.2)$$

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le matériel utilisé, les matières premières et les procédures expérimentales qui concourent à l'élaboration et à la caractérisation de nos matériaux composites sont présentés dans ce chapitre.

2.1 Caractérisations des matières premières

Pour élaborer ces matériaux, nous avons utilisé du ciment, de l'argile, de l'eau, deux essences de bois camerounais (Ayous et Sapelli), des additifs (carbonate de calcium et hydroxyde de sodium).

2.1.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland composé (à la pouzzolane) de classe 42,5R fabriqué au Cameroun par CIMENCAM (cimenteries du Cameroun). Il est communément appelé ciment ROBUST. La société CIMENCAM dispose d'une station de broyage à Bonabéri dans le Littoral, d'une cimenterie intégrée à Figuil (Extrême-Nord) et d'une centrale à béton à Yaoundé dans le Centre [Cimencam 2016].

Applications

- Bétons à hautes résistances : ponts, routes ;

- Bétons structurels fortement sollicités ;
- Bétons armés et bétons de grande masse ;
- Bétons prêts à l'emploi (BPE).

Avantages

- Résistances élevées comparées aux ciments 32,5R ;
- Décoffrage rapide ;
- Prise rapide.

Le ciment est conservé dans les sacs de 50 Kg et doit être placé dans un endroit sec et ventilé.



FIGURE 2.1 – Sac de ciment de marque CIMENCAM 42,5R.

2.1.2 Argile kaolinitique

La composition chimique de l'argile kaolinitique (Kaolin) est présentée dans le **Tableau 2.1** [Douwe 2014]. Elle a été fournie par le groupe Nubru Holding, un partenaire œuvrant pour la valorisation de certaines matières premières Camerounaises.

TABLE 2.1 – Composition chimique du kaolin [Douwe 2014].

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	PF
% massique	39,09	39,44	0,74	0,00	0,13	< L.D	< L.D	0,30	1,14	0,06	18,48

Total : 99,37 ; **L.D** : Limite de détection

2.1.3 L'Ayous

Famille : Sterculiaceae.

Nom scientifique : *Triplochiton Scleroxylon*.

Autres noms : Abachi, Aréré, Ayus, M'Bado, Obéché, Samba, Wawa.

Couleur : Blanche à jaune clair.

Les propriétés indiquées ci-dessous concernent les bois arrivés à maturité. Elles peuvent varier de façon notable selon la provenance et les conditions de croissance du bois [Tropix 2011a].

Propriétés physiques

	<u>Moyenne</u>	<u>Écart-type</u>
Densité	0,38	0,05
Dureté Monnin	1,1	0,4
Coefficient de retrait volumique total	8,2%	0,11%
Retrait tangentiel (RT)	5,0%	0,5%
Retrait radial (RR)	2,9%	0,4%
Ratio RT/RR	1,7%	
Point de saturation des fibres	29%	

Propriétés mécaniques et acoustiques

	<u>Moyenne</u>	<u>Écart-type</u>
Contrainte de rupture en compression	30 MPa	4 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique	52 MPa	9 MPa
Module d'élasticité longitudinal	7260 MPa	1574 MPa

Facteur de qualité musicale : 111,2 mesuré à 2468 Hz

2.1.4 Le Sapelli



FIGURE 2.2 – Copeaux de Sapelli.

Famille : Meliaceae.

Nom scientifique : *Entandrophragma Cylindricum*.

Autres noms : Sapali, Sapele.

Couleur : Brun rouge.

Les propriétés indiquées ci-dessous concernent les bois arrivés à maturité. Elles peuvent varier de façon notable selon la provenance et les conditions de croissance du bois [Tropix 2011b].

Propriétés physiques

	<u>Moyenne</u>	<u>Écart-type</u>
Densité	0,69	0,04
Dureté Monnin	4,2	1,0
Coefficient de retrait volumique total	0,47%	0,06%
Retrait tangentiel (RT)	7,2%	0,9%
Retrait radial(RR)	5,0%	0,6%
Ratio RT/RR	1,4%	
Point de saturation des fibres	29%	

Propriétés mécaniques et acoustiques

	<u>Moyenne</u>	<u>Écart-type</u>
Contrainte de rupture en compression	62 MPa	7 MPa
Contrainte de rupture en flexion statique	102 MPa	11 MPa
Module d'élasticité longitudinal	13960 MPa	2403 MPa

Facteur de qualité musicale : 109,4 mesuré à 2656 Hz

2.1.5 Les additifs

Les informations présentées dans le **Tableau 2.2** sont celles relevées sur les bocaux des additifs chimiques utilisés(**Figure 2.2**).

TABLE 2.2 – Caractéristiques des additifs.

Additifs	Hydroxyde de sodium	Carbonate de calcium
Formule chimique	NaOH	$CaCO_3$
État	paillettes	poudre
Titre massique	96,0%	99%
Impurétés	Na_2CO_3 , Cl, SiO_2 , SO_4 , K, Zn	Mg, As, Fe, Pb, Cl, F, SO_4
Masse molaire(g/mol)	40	100,09

Nous avons choisi le mélange $CaCO_3$ et NaOH en référence aux travaux de [H.A. Abdel-Gawwad& al. 2014]. Ils ont montré que l'on pouvait obtenir des liants(matrice) aux propriétés intéressantes en y incorporant ce mélange.



FIGURE 2.3 – (a) Hydroxyde de sodium (b) Carbonate de calcium.

2.2 Conditionnement des matières premières

Le ciment est conservé au laboratoire des matériaux dans son sac d'origine. Ceci pour éviter qu'il ne s'évente au contact des courants d'air ou ne durcisse sous l'action de l'humidité.

Les copeaux de bois utilisés ont été récupérés avec grand soin dans une menuiserie de la place. Ils sont le résultat du rabotage des planches de bois à l'aide

d'une raboteuse électrique. Ces copeaux sont réduits à l'aide d'un broyeur à lame de marque Retsch (type SM100 -1998) au laboratoire de chimie macromoléculaire de l'université de Yaoundé I. Le tamis choisi lors du broyage a une ouverture de maille carré de l'ordre de 4 mm. Les copeaux réduits (**Figure 2.4**) sont conservés dans des sacs en plastique à température ambiante.



FIGURE 2.4 – (a) Broyeur à lame ; Copeaux réduits : (b) Ayous (c) Sapelli.

L'argile a été introduite dans un four de marque Nabertherm (Modèle N3-1998) avec une vitesse de chauffe de $2,6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à 800°C . Cette température est atteinte au bout de 5h. Ensuite la cuisson se poursuit à 800°C pendant 3h. Cela a été fait dans le but de transformer l'argile en métakaolin.



FIGURE 2.5 – Four de marque Nabertherm.

Les additifs sont conservés dans leur bocaux d'origine.

2.3 Procédure d'élaboration des matériaux composites

Les étapes suivantes ont été suivies lors de l'élaboration de ces matériaux.

Étape 1 : Choix des proportions

Nous sommes partis sur des rapports en masse de 0,7 pour le système eau/matrice et 1/4 pour le système bois/matrice, la masse de ciment au premier essai était de 600g. Vu les résultats obtenus au cours de cet essai, ces rapports ont été modifiés pour les CBCA faits de Sapelli. Nous avons notamment augmenté la masse de ciment de 200g et le rapport bois/liant est passé à 1/3. Le liant qui était au départ uniquement du ciment est substitué progressivement par de le métakaolin à raison de 0%, 20% , 25%, 50% et 75%.

Les quantités d'eau ont été réajustées en fonction de la consistance recherchée. Quant aux additifs, ils représentent 10% en masse de métakaolin répartis comme suit : 55,5% pour le $CaCO_3$ et 45,5% pour le NaOH. Ces derniers ont été utilisés à partir de 50% de métakaolin.

Les réajustements sur les quantités d'eau et de Sapelli ont conduit aux valeurs consignées dans le **Tableau 2.3**. Ces quantités sont celles de 3 éprouvettes identiques de chaque variante. Le dit tableau présente également la formulation des composites élaborés ainsi que la masse en grammes des constituants.

TABLE 2.3 – Formulations des matériaux.

Variantes \ Composants	Ciment	Argile	Ayous	Sapelli	CaCO ₃	NaOH	Eau
AC	600	0	150	0	0	0	420
ACA (20%)	480	120	150	0	0	0	420
ACA (50%)	300	300	150	0	16,7	13,3	500
ACA (75%)	150	450	150	0	25	20	550
SC	800	0	0	266,7	0	0	420
SCA (25%)	600	200	0	266,7	0	0	500
SCA (50%)	400	400	0	266,7	22,2	17,8	580
SCA (75%)	200	600	0	266,7	33,3	26,7	600

Les pesées sont faites à l'aide d'une balance électronique de marque Sartorius (Max =3640g et Min =5g) dont la précision est de 0,1g. Une éprouvette graduée de 1000 mL est utilisée pour mesurer les quantités d'eau (voir **Figure 2.6**).



FIGURE 2.6 – Balance Sartorius et éprouvette graduée de 1000 mL.

Étape 2 : Malaxage du mélange

Cette étape s'est faite différemment selon la présence ou pas de métakaolin ou d'additifs. Trois processus ont été suivis mais le malaxeur (**Figure 2.7**) est maintenu à vitesse lente.



FIGURE 2.7 – Malaxeur de marque Perrier.

- les CBC

On introduit le ciment et les copeaux de bois dans la cuvette du malaxeur qui est mis en marche à vitesse lente pendant 3 min. Puis l'eau est incorporée progressivement au mélange, le malaxeur étant toujours en marche. Une fois la consistance recherchée atteinte ou le volume d'eau prédéfini écoulé, le malaxage s'est poursuivi sur trois autres minutes.



FIGURE 2.8 – Étapes du malaxage.

- Les CBCA sans additifs

Ici, le MK a été au préalable réduit en poudre, puis malaxer avec du ciment 1 min environ. Les copeaux de bois sont ajoutés au mélange obtenu et le malaxage se poursuit. L'eau est utilisé comme précédemment.

- Les CBCA avec additifs

On introduit l'hydroxyde de sodium dans la cuvette du malaxeur et on y verse 100mL d'eau. La cuvette est agitée afin d'accélérer la dissolution. Cela étant fait, le carbonate de calcium est ajouté et le malaxeur mis en marche pour 2 min. Puis, l'argile est ajoutée au mélange et le malaxage se poursuit pendant 3 min. Le ciment est à son tour versé et le malaxeur mis en marche pendant 3min. Au cours de ces différentes opérations de malaxage, l'eau a été progressivement ajoutée. Les copeaux de bois sont incorporés dans la pâte et le reste d'eau prédéfini est ajouté. Une ultime opération de malaxage est lancée pour 3 min.



FIGURE 2.9 – Malaxage des additifs et du métakaolin.

Étape 3 : Remplissage du moule

Introduire le mélange eau-liant-bois obtenu dans des moules à 3 compartiments. Chaque compartiment de dimension $4 \times 4 \times 16(cm^3)$ est préalablement lubrifié pour éviter l'adhérence du mélange sur les parois.



FIGURE 2.10 – Moule lubrifié.

Remplir le moule et le monter sur une table à chocs qui est actionnée une fois par essai.

Enlever l'excès par un mouvement de va et viens, effectué avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.



FIGURE 2.11 – Moulage des matériaux.

Le moule est ensuite recouvert d'une plaque, sur laquelle on pose une colonne de béton. Cette opération permet d'une part de limiter l'évaporation de l'eau qui servira à hydrater le liant et d'autre part de maintenir le moule sous une légère pression. Il convient de préciser que des pressions plus importantes sont exercées lors de la production industrielle de ces composites, pour permettre un bon tassement et réduire les vides. L'ensemble est conservé à température ambiante (voir **Figure 2.12**).



FIGURE 2.12 – Conservation des éprouvettes moulées.

Les éprouvettes sont démoulées après 2 jours et conservées à température ambiante au laboratoire de géotechnique et matériaux.



FIGURE 2.13 – Démoulage des éprouvettes.

2.4 Caractérisations mécaniques

Les tests de caractérisations mécaniques ont pour but de déterminer des caractéristiques du matériau indispensable pour des applications.

2.4.1 Test de flexion trois points

Ce test est réalisé sur les éprouvettes parallélépipédiques de dimensions $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$

entre trois points d'appui ; On applique un effort sur le point central (voir **Figure 2.14**).

L'effort est augmenté progressivement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



FIGURE 2.14 – Dispositif expérimental de l'essai de flexion.

La lecture de la charge à la rupture F permet d'obtenir la résistance à la flexion σ_f donnée par l'équation 1.1 : $\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$.

L'appareil utilisé a les caractéristiques suivantes : $L = 106,7$ mm.

2.4.2 Test de compression uniaxiale

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. Il est réalisé sur les demi-éprouvettes résultant de la flexion. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La charge est appliquée sur une surface de $4 \times 4\text{cm}^2$.

La conduite de l'essai est la suivante : L'éprouvette est centrée sur entre les deux

plateaux de la presse (le plateau inférieur est mobile et le supérieur est fixe). La mise en charge est effectuée manuellement et une vitesse de montée lente est choisie. La charge de rupture est la charge maximale lue au cours de l'essai. La résistance à la compression est donnée par l'équation [Dorlot & al. 1995] :

$$\sigma_{max} = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique de marque perrier (**Figure 2.15**).



FIGURE 2.15 – Dispositif expérimental de l'essai de compression.

2.5 Caractérisations physico-chimiques

2.5.1 Absorption d'eau par immersion sous pression atmosphérique

Les éprouvettes utilisées pour le test d'absorption d'eau ont été au préalable séchées dans une étuve à 105 °C durant 33h, afin d'éliminer l'eau libre contenu dans le matériau. Les éprouvettes sont complètement immergées dans de l'eau à hauteur de 8 cm, sous pression atmosphérique (**Figure 2.16**). Les masses sont relevées au bout des intervalles de temps allant de 30 min à 1h.



FIGURE 2.16 – Dispositif expérimental de l'absorption d'eau par immersion .

À un instant donné, l'absorption d'eau par immersion (Abs) est exprimée en pour-cent de la masse sèche. Elle est calculée par la relation suivante [ir c. ployaert 2009] :

$$Abs = \frac{m_{humide} - m_{seche}}{m_{seche}} \times 100 \quad (2.2)$$

Avec :

- m_{humide} : Masse humide de l'éprouvette après immersion ;
- m_{seche} : Masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

2.5.2 Test de vieillissement

Après 14 jours de séchage à température ambiante, les éprouvettes sont soumises à des changements brusques de température via le cycle suivant :

- Immersion dans de l'eau à 20°C pendant 24h ;
- Refroidissement à 17°C pendant 24h également ;
- 2h de décongélation ;
- Chauffage à 80°C pendant 22h ;
- Séchage à température ambiante 48h.

La durée du test de vieillissement est de 14 jours au cours desquelles 3 cycles ont été réalisées. Les éprouvettes résultantes seront testées mécaniquement à 28 jours (à compter de leur élaboration).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus lors des différents essais et tests décrits au chapitre précédent. Chaque résultat est accompagné d'une analyse (Diagramme, courbes) suivi d'une discussion. Les valeurs consignées dans les tableaux à suivre résultent d'une moyenne de mesures faite sur les éprouvettes de chaque variante.

3.1 Présentation des matériaux composites élaborés

Une photo des éprouvettes élaborées est présentée à la **Figure 3.1**.



FIGURE 3.1 – Éprouvettes élaborées.

3.2 Étude du comportement mécanique

Les composites élaborés ont été testés en flexion trois points et en compression uniaxiale respectivement à 7 jours et à 28 jours. Les valeurs consignées dans les tableaux sont une moyenne de 2 ou 3 essais.

3.2.1 Comportements mécaniques au jeune âge(7 jours)

TABLE 3.1 – Résistances à 7 jours.

Variantes	AC	ACA 20%	ACA 50%	ACA 75 %	SC	SCA 25 %	SCA 75 %
Résistance en compression(MPa)	7.41	7.27	6.04	3.78	19.14	11.09	0.5
Résistance en flexion(MPa)	3.91	3.91	3.30	2.44	3.54	4.39	-

Étude du comportement en compression uniaxiale

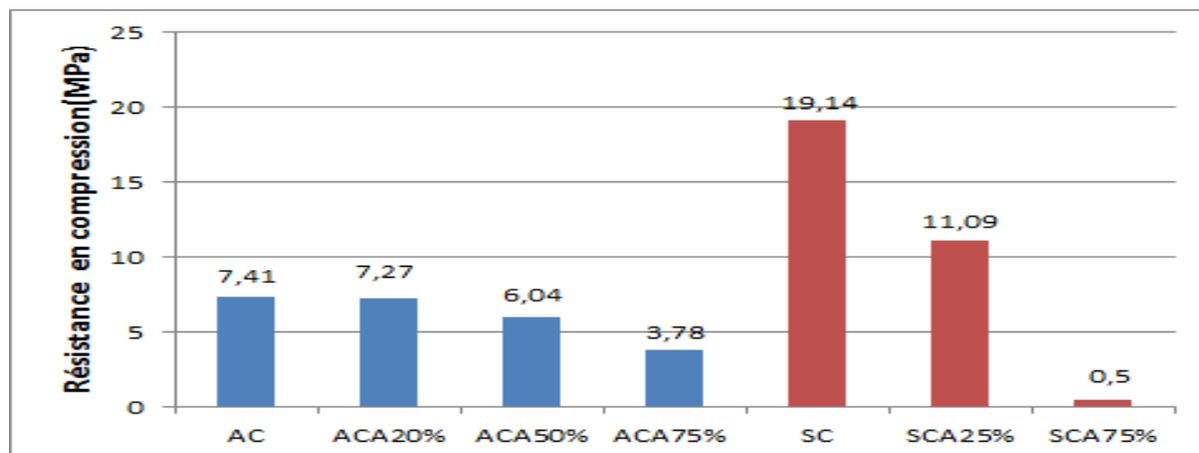


FIGURE 3.2 – Résistances en compression à 7 jours.

À 7 jours, les résistances en compression diminuent progressivement avec l'ajout de MK. Cette diminution n'est toutefois significative qu'à des pourcentages élevés

en MK. Le type de bois influe énormément sur cette diminution car les composites faits de Sapelli ont présenté une diminution plus prononcée. Par ailleurs, il a été trouvé avec du Sapelli, que pour un taux de remplacement du ciment par le Mk de 75%, la résistance en compression des composites obtenue est pratiquement nulle. Ce résultat semble montrer une certaine incompatibilité entre le Sapelli et le MK. Le Sapelli pourrait donc retarder l'hydratation voire inhiber l'activité pouzzolanique du métakaolin.

Étude du comportement en flexion trois points

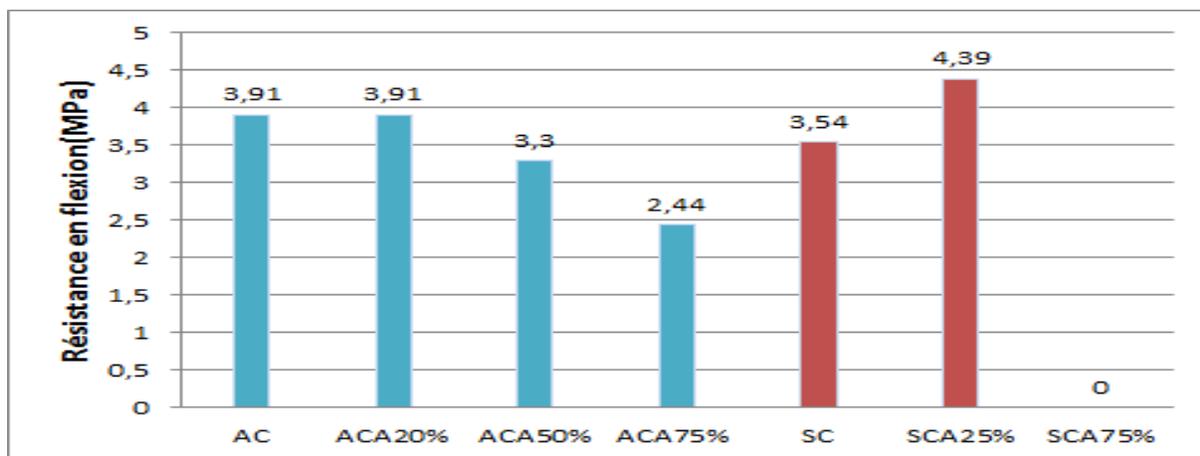


FIGURE 3.3 – Résistance en flexion trois points à 7 jours.

La **Figure 3.3** montre que pour les composites faits d'Ayous, la résistance en flexion au jeune âge diminue tout comme la résistance en compression avec l'ajout de MK. Cette diminution reste significative qu'à des pourcentages élevés. Un phénomène inattendu est observé avec les composites du Sapelli. Entre 0 et 20%, la résistance en flexion croît plutôt avec l'ajout de MK. Par contre à 75%, la résistance en flexion de ces composites est nulle ; ce qui semble indiquer un faible degré d'hydratation.

3.2.2 Comportements mécaniques à 28 jours

Les résistances en compression et en flexion ont été déterminées comme le veut la norme à 28 jours; car un matériau est censé avoir pratiquement 90% de sa résistance ultime à cette âge. Les valeurs correspondantes sont consignées dans le **Tableau 3.2**.

TABLE 3.2 – Résistances à 28 jours.

Variantes	Masse volumique (g/L)	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)
AC	1121,77	5,55	12,06
ACA20%	1145,72	5,68	11,09
ACA50%	1085,71	4,34	7,41
ACA75%	1064,06	3,45	6,38
SC	1257,45	7,33	22,44
SCA25%	1227,60	5,74	13,69
SCA50%	1054,68	0,93	1,02
SCA75%	1039,06	-	-

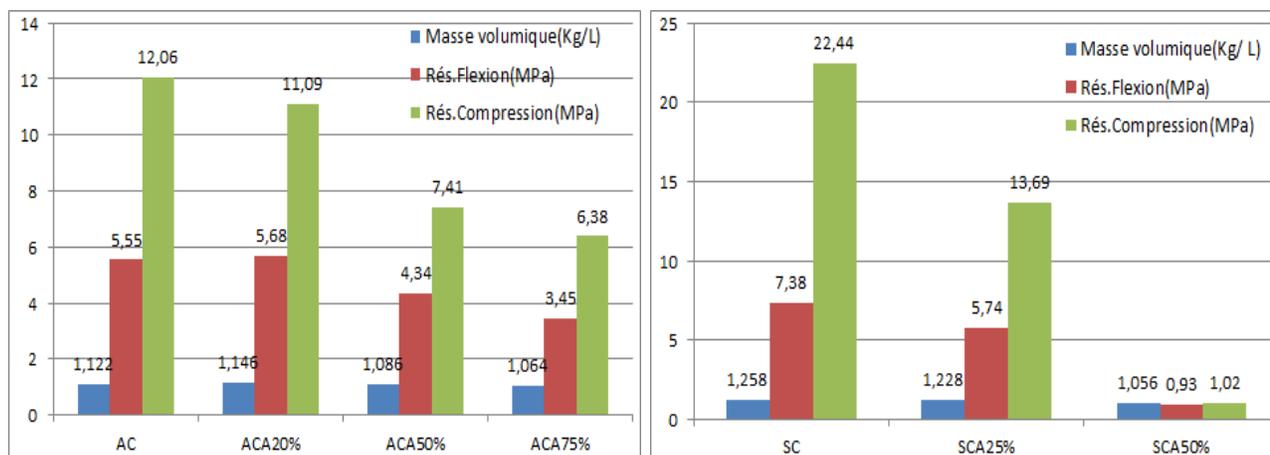


FIGURE 3.4 – Caractéristiques des matériaux à 28 jours.

On note qu'au bout de 28 jours, la résistance des composites a augmenté aussi bien en compression qu'en flexion. Par ailleurs, la résistance en flexion diminue avec l'ajout de MK pour les deux essences de bois ; Ce qui n'était pas le cas au jeune âge (**Figure 3.3**).

La **Figure 3.4** montre globalement que la masse volumique, les résistances en compression et en flexion diminuent avec l'ajout de MK. Les valeurs plus élevées obtenues avec le Sapelli sont dues à leur plus grande masse volumique. La diminution de masse volumique observée en général avec l'ajout de MK, pourrait montrer que les systèmes constitués de métakaolin fixent moins d'eau ou sont dans un état d'hydratation moins avancé. Cette faible hydratation pourrait expliquer les faibles résistances obtenues. Toutefois, pour un taux de 20%, les composites faits d'Ayous ont une résistance en flexion plus élevée.

Au cours de l'hydratation des pâtes de ciment avec ajout de 20% de métakaolin, **Love & al. (2007)** ont trouvé qu'à 1 jour, environ la moitié de ciment était hydraté et très peu de MK ; et à 28 jours, deux-tiers de ciment était hydraté et la majorité de MK lorsque l'agent hydratant était juste de l'eau. Cependant, pour une solution alcaline 5M de KOH comme agent hydratant, après 1 jour, la moitié de ciment et presque le quart de MK étaient hydratés ; alors que l'hydratation du ciment n'avait plus évolué à 1 jour. Ces résultats montrent la complexité du phénomène d'hydratation et la nécessité des analyses complémentaires pour la compréhension des phénomènes mis en jeu dans nos composites. On peut tout de même noter que, pour un taux de 20%, les composites faits d'Ayous ont des résistances comparables avec le contrôle(AC).

3.3 Effet du vieillissement accéléré

Le vieillissement accéléré est un test utilisé régulièrement dans le domaine des matériaux pour étudier le comportement de ces derniers à long terme. Il est généralement fait sur des mois. Les matériaux sont soumis à des conditions extrêmes (humidité, chaleur, gel). Nous avons imposé un cycle humidification/refroidissement/séchage décrit au chapitre précédent. Les éprouvettes résultantes ont été testées mécaniquement à 28 jours. Les caractéristiques de ces dernières sont présentées dans le **Tableau 3.3**.

TABLE 3.3 – Résistances des matériaux vieillis.

Variantes	Masse volumique (g/L)	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)
AC	1066,42	6,35	10,09
ACA20%	1080,67	6,08	10
ACA50%	994,16	5,13	8,91
SC	1189,96	6,43	20,22
SCA25%	1134,42	4,58	12,63

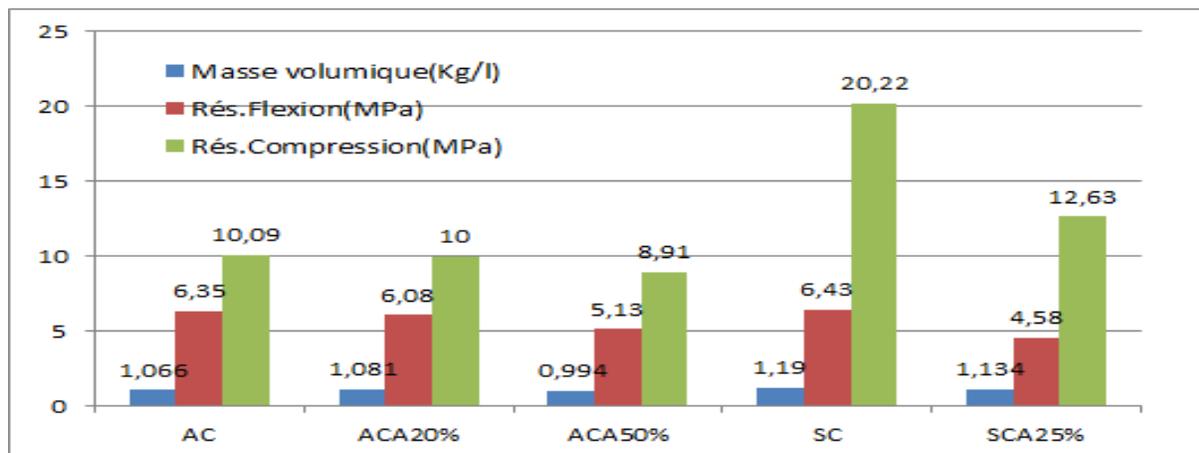


FIGURE 3.5 – Caractéristiques des matériaux vieillis.

La **Figure 3.5** présente les caractéristiques des matériaux résultants du cycle de vieillissement accéléré. Ces matériaux ont suivi trois fois le dit cycle.

3.3.1 Effet sur la masse volumique

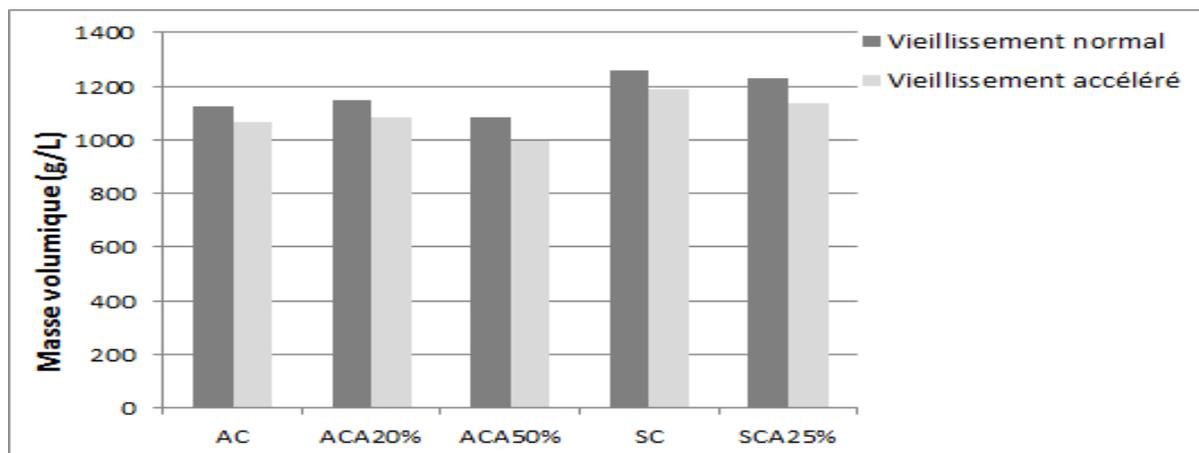


FIGURE 3.6 – Masse volumique des variantes vieilles.

La **Figure 3.6** montre que les composites résultants du cycle de vieillissement ont des masses volumiques inférieures à ceux vieillis à température ambiante. La diminution de masse volumique peut être due à la perte d'une fraction de la matrice et à l'élimination des substances extractibles du bois engendrée par l'immersion sous l'eau au cours du cycle.

3.3.2 Effet sur la résistance en compression

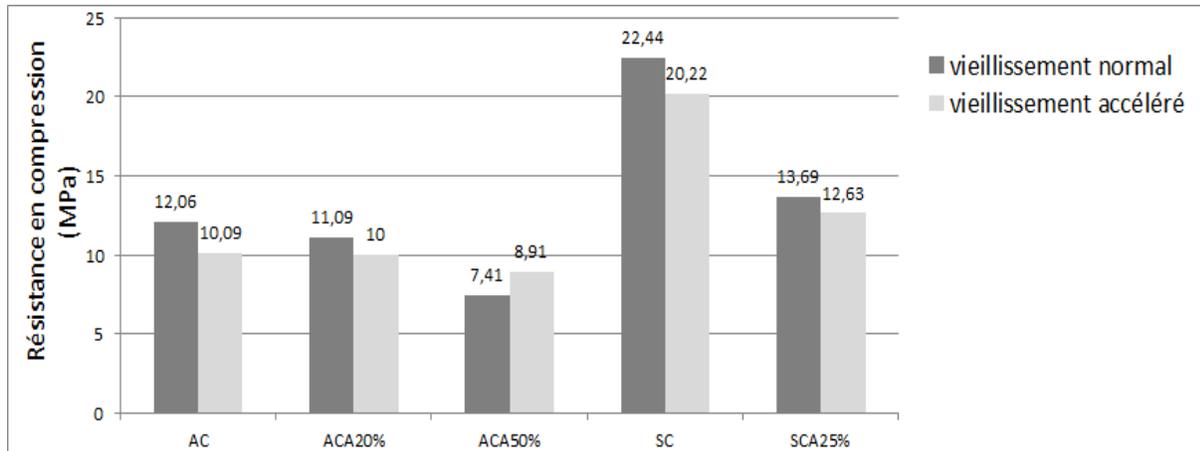


FIGURE 3.7 – Résistance en compression des variantes vieilles.

Jusqu'à 25% de métakaolin, la résistance en compression des composites à vieillissement accéléré est inférieure à celle des composites à vieillissement normal. L'observation contradictoire faite à 50% semble montrer une hydratation continue dans ces composites. Ceci se confirme par la diminution d'écart de résistance observés entre 0 et 25%; en effet, cet écart passe de 1,97 à 1,09 MPa pour l'Ayous et de 2,22 à 1,06 MPa pour le Sapelli. L'explication réside dans l'hydratation des systèmes; L'hydratation est accélérée par la chaleur au cours du cycle de vieillissement. Les hydrates remplissent un peu plus les vides de la matrice qui résiste désormais plus à la compression. Les effets de l'augmentation du degré d'hydratation de la matrice sur la résistance en compression, sont sans doute atténués par les pertes en masse de l'éprouvette; comme le montre la diminution de densité(masse volumique). De nouveaux vides sont sûrement créés lorsque la matière est transférée.

3.3.3 Effet sur la résistance en flexion trois points

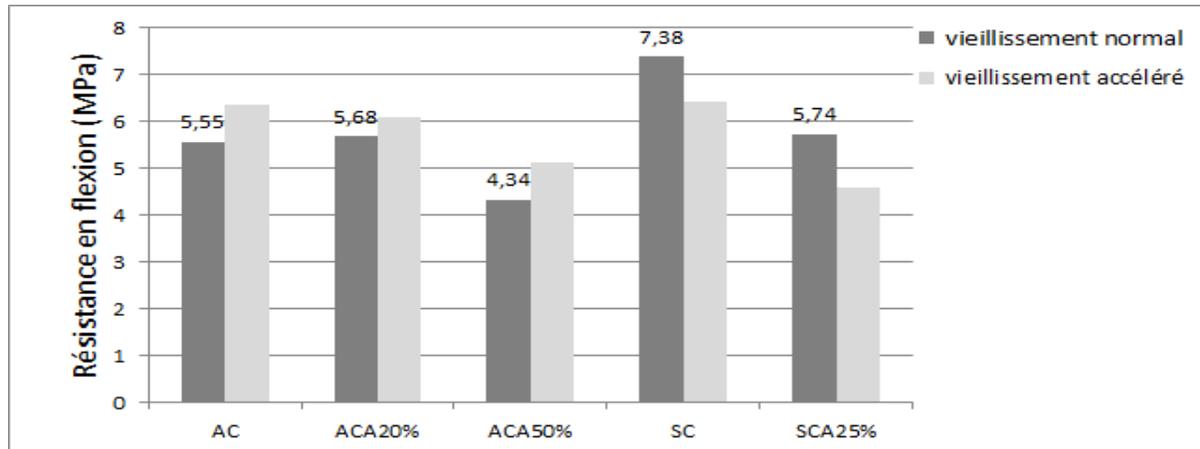


FIGURE 3.8 – Résistance en flexion trois points des variantes vieilles.

À 28 jours, les résistances en flexion des CV présentées à la **Figure 3.8** sont supérieures à celles des CNV pour l’Ayous. Le Sapelli quant à lui, se comporte différemment. La nature du bois influe sur la résistance en flexion à long terme de ces matériaux. Cependant, la résistance en flexion des CV croît tout comme celle des CNV avec l’ajout de métakaolin. Nous constatons que le métakaolin réagit positivement avec le ciment et que la résistance à la flexion des composites continue à croître avec le temps.

Le cycle humidification/congélation/séchage que nous avons imposé aux matériaux a été d’une courte durée(14 jours). Néanmoins, il a permis d’augmenter les résistances en flexion. On peut noter globalement que ces matériaux gardent l’essentiel de leur propriétés mécaniques, après le troisième cycle du vieillissement appliqué. Il serait intéressant d’étudier leur comportement, après plus d’une centaine de cycle comme le recommande la norme ; ceci pour mieux apprécier la durabilité des matériaux.

3.4 Étude de l'immersion sous pression atmosphérique

Les éprouvettes ont été immergées dans l'eau durant 5h. Les masses relevées après chaque heure nous ont permis de déterminer les volumes d'eau absorbée de 0h à une heure quelconque. Le **Tableau 3.4** présente les valeurs obtenues.

TABLE 3.4 – Volume d'eau absorbée.

Variantes	temps(h)					
	0	1	2	3	4	5
AC	0	57	74,1	83,5	89,8	93,9
ACA (20%)	0	71,6	88,9	96,7	100,1	102,9
ACA (50%)	0	92	108,3	115,3	118,6	119,6
ACA (75%)	0	129,5	131,1	131,6	131,8	132,2
SC	0	69	82	87,1	89,6	92
SCA (25%)	0	82,4	90,7	94,9	97,9	100,2

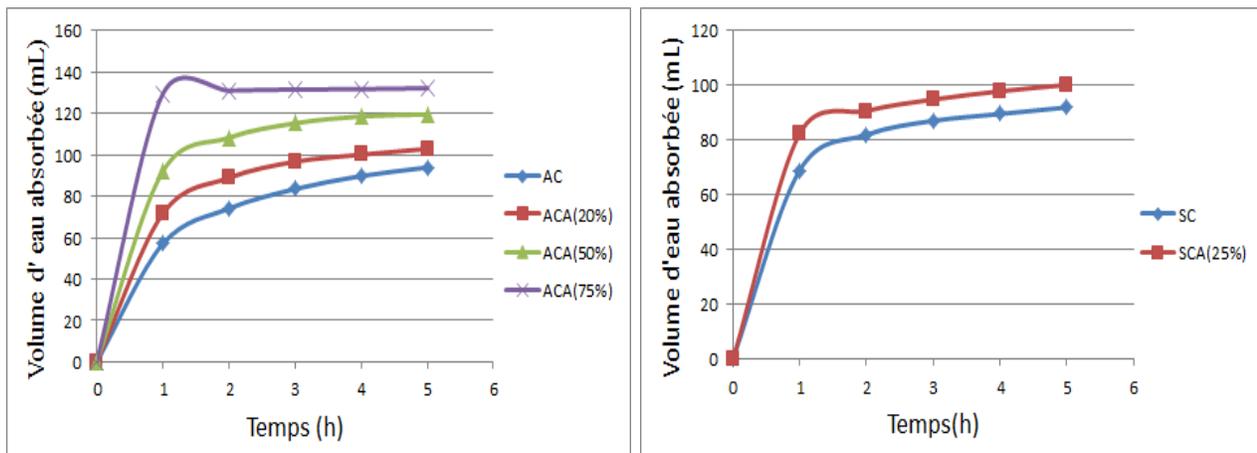


FIGURE 3.9 – Volume de l'eau absorbée en fonction du temps.

De prime abord, les courbes de la **Figure 3.9** croissent progressivement avec le temps. Les composites à matrice composée absorbent plus d'eau que ceux à

matrice pure. Ces résultats sont globalement en accord avec les propriétés mécaniques précédemment présentées (résistance en compression). L'absorption croît avec la porosité des matériaux ; plus un matériau est poreux, moins il est résistant en compression.

3.4.1 Coefficient d'absorption d'eau

Le coefficient d'absorption des composites a été déterminé à 96h (4 jours). Les valeurs obtenues sont consignées dans le **Tableau 3.5**. Les masses sèches, relevées à la sortie de l'étuve et les masses humides qui sont relevées après 4 jours d'immersion sont aussi dans ce tableau.

TABLE 3.5 – Coefficient d'absorption d'eau par immersion.

Variantes	Masse sèche (g)	Masse humide (g)	Coefficient d'absorption (%)
AC	253,6	364,3	43,65
ACA20%	250,1	364,9	45,90
ACA50%	252,8	380,5	50,51
ACA75%	235,3	376,8	60,14
SC	322,4	423	31,20
SCA25%	303,4	416,1	37,15

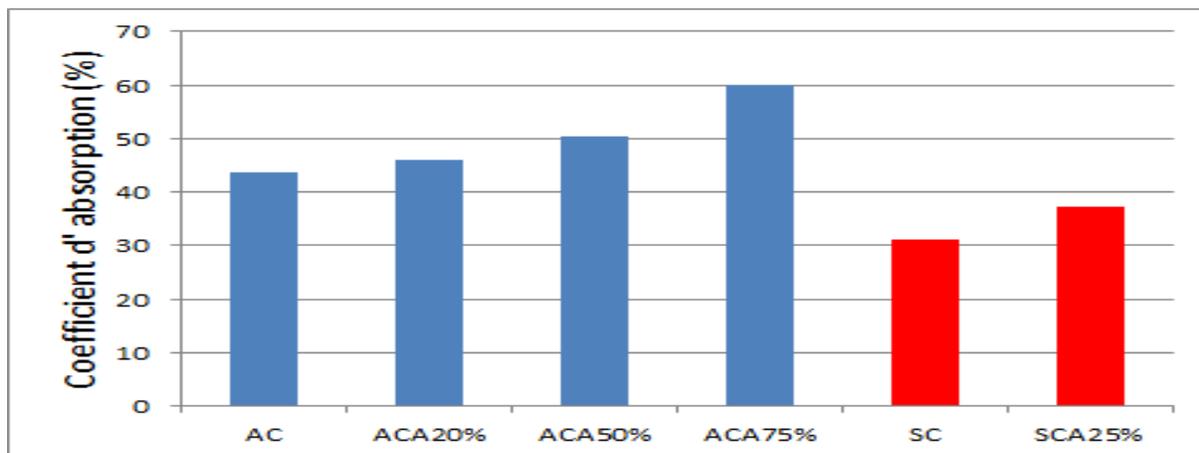


FIGURE 3.10 – Coefficient d'absorption de quelques variantes.

La **Figure 3.10** illustre le fait que le coefficient d'absorption d'eau augmente avec l'ajout de métakaolin qu'importe le type de bois. Les faibles valeurs obtenues avec le Sapelli sont dues à sa plus grande densité qui rend le matériau plus compacte.

IMPLICATIONS DANS LE SYSTÈME ÉDUCATIF

Émile Durkheim dans le Nouveau dictionnaire de pédagogie et d'instruction primaire, publié sous la direction de Fernand Buisson (1911), définit le système éducatif comme les « sommes de pratiques éducatives ». Dans son sens historique, le système éducatif (ou scolaire) renvoie à une mise en système, à la construction d'un système cohérent à partir de noyaux éloignés, juxtaposés, voire disjoints. Dans son acception contemporaine, il s'agit de l'ensemble des institutions qui participent à la fonction éducative, et aussi de l'organisation d'ensemble de l'architecture scolaire, c'est-à-dire du déroulement général des études : cycles, filières, orientations[B. Hameni 2005]. Il s'agira dans ce chapitre de présenter les changements que peuvent apporter notre sujet dans le système éducatif. Ceci passera bien sûr par la communication de l'intérêt didactique de ce dit sujet. Puis par un exemple de séquence de cours qui peut être adopté à partir de notre sujet.

4.1 Intérêt didactique

La didactique est l'étude des questions posées par l'enseignement et l'acquisition des connaissances dans les différentes disciplines scolaires. La didactique d'une discipline est la science qui étudie, pour un domaine particulier, les phénomènes d'enseignement, les conditions de la transmission de la culture propre à une institution et les conditions de l'acquisition de connaissances par un appre-

nant. C'est la science qui tient compte à la fois des caractéristiques de l'homme à former (apprenant), de la matière à dispenser et de la structure interne de chaque matière. Dès lors, poser la question de l'intérêt didactique d'une notion ou d'un sujet revient à poser la question de son importance et plus exactement, de la place que peut avoir ladite notion ou ledit sujet dans l'enseignement.

Notre sujet porte sur les matériaux composites bois-ciment-métakaolin, en particulier, sur l'élaboration et la caractérisation de ces derniers. Ce sujet en l'occurrence, peut avoir un intérêt dans l'enseignement secondaire technique pour la spécialité maçonnerie ; voire même supérieur dans la spécialité génie civil. Or, les matériaux composites en général, ne sont pas largement abordés dans l'enseignement secondaire. En effet, dans certaines classes, ils sont abordés mais ne sont pas appelés comme tel. Il s'agit des classes de spécialité maçonnerie ; où, le béton et le béton armé qui sont des matériaux composites du ciment font l'objet des ateliers. De manière générale, les matériaux composites peuvent être abordés à différents niveaux de l'enseignement. Nous suggérons que les enseignements s'intéressent à la valorisation des ressources locales et à l'utilisation des matières premières non polluantes. Et dans la partie traitant de la valorisation des ressources locales, il serait judicieux de souligner que le Cameroun regroupe plusieurs variétés de bois que l'on peut utiliser dans la composition des matériaux composites. Par ailleurs, rappeler aux apprenants que la fabrication du ciment est un processus qui est à l'origine de 5% de la pollution mondiale.

4.2 Fiche pédagogique

Séquence : Élaboration et caractérisation d'un matériau composite bois-ciment-métakaolin.

Niveau des apprenants : maçonnerie-bâtiment.

Objectifs : À la fin de ce cours, l'élève sera en mesure d'identifier les principales étapes, les méthodes et les différents matériaux utilisés lors de la réalisation d'un matériau composite bois-ciment-métakaolin.

But du processus d'apprentissage : Cette séquence vise à faire acquérir aux apprenants des méthodes de travail et de raisonnement autant que des connaissances, des principes de mise en oeuvre et des procédés.

Durée de la séquence : 3h

Pré-réquis : Généralités sur les matériaux de construction.

Méthode de travail : La séquence sera une séance de travaux pratiques; ils seront organisés en groupe dont la taille dépendra du matériel mise à disposition et du quota horaire prévu pour cette unité d'enseignement.

La démarche pédagogique : La fiche pédagogique, dans cette partie consacrée à l'implication pédagogique de notre sujet, est à la fois une fiche d'activité et de cours. Nous l'appelons fiche-élève, cette dernière illustre les différentes activités pédagogiques menées par l'enseignant (activités de l'enseignant) et ceux menées par les élèves (activités d'apprentissage).

4.3 Fiche-élève

Dans la suite, la lettre **Q** fera référence aux questions posées par l'enseignant ; et **R** aux réponses attendues des apprenants.

Activité 1 : Informations préliminaires sur les matériaux composites.

Objectifs spécifiques

L'élève doit être capable de :

- Définir les termes suivants : matériau composite, matrice, renfort, charge ;
- Citer quelques matériaux composites utilisés dans la construction.

Déroulement de l'activité

Cette activité est essentiellement constituée de questions et de réponses.

Q₁ : Définir un matériau.

R₁ : Un matériau est l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation d'un ouvrage.

Q₂ : Citer des matériaux utilisés dans la construction.

R₂ : Parpaings, béton, béton armé, brique, bois, acier.

Q₃ : Citer les éléments utilisés lors de la production du béton.

R₃ : Ciments, gravier, sable, eau.

Q₄ : Parmi les matériaux cités précédemment, lesquels sont constitués de plusieurs éléments ? (l'eau est exclus)

R₄ : Béton, béton armé, parpaings.

Q₅ : Comment appelle t-on ce type de matériaux ?

R₅ : Matériaux composites.

À retenir : Parmi les matériaux utilisés dans la construction (béton, bois, brique,...), on retrouve des matériaux composites. Un matériau composite est un matériau solide, constitué d'au moins deux éléments différents, qui ne fondent pas l'un dans l'autre. L'intérêt de ces matériaux est de cumuler les avantages de chaque matériau. Les principaux constituants sont la matrice (minérale, organique, métallique) et le renfort (ou charge). Les renforts (ou charge) peuvent provenir de plusieurs sources (plantes, animaux, minéraux, synthétiques, ...).

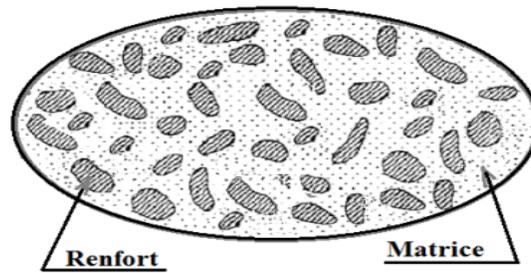


FIGURE 4.1 – Matériau composite.

Le renfort a pour mission de supporter l'essentiel des efforts mécaniques appliqués au matériau composite. La charge quant à elle, permet de réduire les coûts de production et d'améliorer des propriétés autre que les propriétés mécaniques. Le rôle de la matrice (ou liant) est de lier les renforts/charges entre eux, de les protéger du milieu extérieur et de répartir l'effort mécanique appliqué.

Activité 2 : Élaboration d'un matériau composite bois-ciment-métakaolin.

Objectifs spécifiques

L'élève doit être capable de :

- Définir les termes suivants : métakaolin ; Pollution.
- Élaborer un matériau composite bois-ciment-métakaolin.

Déroulement de l'activité

Cette activité est un travail pratique. Il sera demandé à chaque élève de récupérer des copeaux de bois dans une menuiserie, avant le jour du T.P. Le type de bois ne sera pas imposé ;

Matériel(à prévoir par groupe d'élèves).

- 480g de ciment ;
- 120g de métakaolin(argile calcinée) ;

- 150g de copeaux de bois(broyés ou réduits) ;
- eau ;
- éprouvette graduée de 1000mL ;
- balance électronique ;
- moule, lubrifiant, petit pinceau ;
- mini-pelles ;
- cuvette, assiettes creuses ;
- truelle ou outil présentant un bord droit.

Mode opératoire

Préparation de la pâte

- Peser les différents constituants ;
- Introduire le ciment et le métakaolin dans la cuvette, et malaxer le mélange à sec ;
- Introduire les copeaux de bois et malaxer le tout à sec ;
- Ajouter de l'eau progressivement en malaxant jusqu'à obtention d'une pâte ;
Attention! le volume d'eau utilisé sera donné dans le compte rendu. vous êtes invités à utiliser une éprouvette.

Remplissage du moule

- Lubrifier le moule ;
- Remplir le moule en pressant la pâte ;
- Vibrer vigoureusement le moule en le laissant tomber sur la plateforme ;
- Rajouter un peu de pâte et tasser à l'aide de la truelle ou d'un objet droit.

Compte-rendu

Le compte-rendu se fera en groupe et sera remis à la prochaine séance. L'en-tête contiendra les éléments suivants : Date, numéro du groupe, titre du tp, objectif

ou but et les noms des membres présents.

Les réponses aux questions ci-dessus doivent suivre l'en-tête.

1. Donner le volume d'eau utilisé lors de l'élaboration de votre matériau composite.
2. En déduire la masse totale de votre échantillon.
3. Nommer l'essence de bois et le ciment utilisé dans votre groupe.
4. Préciser le rôle (matrice, charge/renfort) des éléments utilisés dans la composition de votre matériau.
5. Définir métakaolin.
6. En 5 phrases, dites en quoi la production du ciment contribue à la pollution.

Les échantillons seront démoulés à la prochaine séance ; et les tests d'absorption d'eau seront réalisés.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre général de l'étude des propriétés mécaniques et absorbantes des matériaux composites à matrice minérale chargée par la matière végétale.

L'objectif de ce travail était l'exploitation du métakaolin dans des matrices cimentaires afin d'élaborer des matériaux composites bois-ciment-métakaolin. Nous avons visé deux types de composites : les composites chargés de copeaux réduits d'Ayous et ceux chargés de Sapelli. Dans les deux cas, le mélange ($CaCO_3 + NaOH$) est utilisé à partir d'un taux de remplacement de 50% afin d'activer le métakaolin. Lors du développement des composites, nous avons évalué les propriétés mécaniques et d'absorption en faisant varier le pourcentage de métakaolin de 0% à 75%.

La caractérisation mécanique de ces composites a montré globalement une diminution des résistances (en flexion trois points et compression uniaxiale) à 7 et 28 jours, avec l'augmentation du pourcentage de MK ; à l'exception de la résistance en flexion à 7 jours des composites chargés de Sapelli. Une légère baisse de résistance a été observée pour les composites chargés d'Ayous entre 0% et 20%.

Le test d'absorption a montré l'augmentation du coefficient d'absorption avec l'ajout de MK ; et les composites chargés de Sapelli présentait des coefficients d'absorption plus faibles.

Le cycle de vieillissement imposé aux matériaux, augmente les résistances en

flexion(trois points) et diminue les résistances en compression.

L'ensemble de ce travail montre que le métakaolin peut être utilisé avec succès par substitution du ciment à moins de 20%. Les composites bois-ciment-métakaolin ont des propriétés qui dépendent du type de bois et du pourcentage d'ajout de métakaolin. Par ailleurs, ce sujet peut faire l'objet de quelques séquences de cours ; Toutefois, ces cours peuvent être limités par le manque de matériel adéquat.

Ces résultats montrent la complexité des phénomènes d'hydratation responsable du développement des propriétés mécaniques. Des études complémentaires seront envisagées dans le futur, pour élucider les mécanismes et définir les conditions optimales pour les différents systèmes. Nous envisageons de recourir à d'autres essences de bois. Et de caractériser à nouveau des composites bois-ciment-métakaolin, avec cette fois, des pourcentages de métakaolin variant de 0% à 20%.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-A-

Andriamananstilavo.N(2003) Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation. Thèse Ph.D, Université de BOUMERDÈS, Algérie.

-B-

Blaise HAMENI (2005) Les méthodes actives dans le système éducatif camerounais : le cas de la NAP dans l'enseignement de la philosophie en classes de terminale à Yaoundé. Master II, Université de Rouen.

Banthia, N., Yan C.(1996) Bond-Slip Characteristics of Steel Fibers in High Reactivity Metakaolin (HRM) Modified Cement-Based Matrices. In : Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 5, pp. 657-662,1996.

Berthelot D.(1996) Matériaux composites. Paris, Masson.

-C-

CHEUMANI YONA A. (2009) Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton. Thèse Ph.D, Université de Bordeaux I, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, France.

Cimbéton (2005) G10 : Les constituants des bétons et des mortiers : P8-13.

Cimencam 2016. Disponible sur :<http://www.cimencam.com/wps/portal/cm/fr/qui-sommes-nous>.

Cours ciments et bétons. Disponible sur :<http://geniecivil.univ-tlse3.fr/L3GC/enseign/Co/20ciment/et/beton.pdf> (consulté le 10/02/2015).

-D-

D. TAOUKIL, A. EL BOUARDI, T. AJZOUL, H. EZBAKHE (2011) Caractérisation mécanique et hydrique d'un béton allégé avec les résidus de bois. Revue internationale d'héliocentrique No.43, 1-7.

DJOUDI A., KHENFER M/M., BALI A., DEBICHI G.(2007) L'utilisation des biomatériaux dans la construction, une alternative pour la protection de l'environnement. Séminaire national de génie civil, Annaba.

DOUWE Philippe(2014) Comparaison entre les propriétés des géopolymères à base de métakaolinite et de métahalloysite. Magister, spécialité Chimie Organique, UNIVERSITE DE YAOUNDE I, Cameroun.

-F-

Fertikh Salah, Merzoud Mouloud, Habita Med Fouzi, Benazzouk Amar.(2011) Comportement mécanique et hydrique des composites à matrice cimentaire et argileuse à base de diss(*Ampelodesma mauritanica*). *XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

-G-

G. Promis, A. Gabor, P. Hamelin.(2009) Behavior of beams made in textile reinforced mineral matrix composites. *Comptes Rendus des JNC 16 Toulouse*.

-H-

H.A. Abdel-Gawwad et S.A. Abo-El-Enein.(2014) A novel method to produce dry geopolymer cement powder. *HBRC Journal*,<http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.0>

-I-

ir C. Ployaert (2009) Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau. Belgique, A.Jalenski, 15.

-K-

KHELIFI Walid, BELOUETTAR Redjem.(2012) Influence de la nature des copeaux de bois sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons à base de copeaux de bois. XXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Chambéry, 6 au 8 juin 2012.

-L-

Loane BIGORGNE (2011) Mécanique et mécanisme de rupture dans le plan transverse du bois résineux. Thèse Ph.D, INSA de LYon, Spécialité Mécanique-G'enie mécanique-Génie civil, France.

Love C.A, Richardson I.G, Brough A.R (2007) Composition and structure of C-S-H in white portland cement 20% metakaolin pastes hydrated at 25°C. Cement and concrete Research, No. 33 : 109-117.

-M-

M. Le Troedec (2009) Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulose. Thèse Ph.D, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, École Doctorale Sciences-Technologies-Santé Groupe d'Étude des Matériaux Hétérogènes.

Mohssine Moutee et Mario Fafard (2005) Modeling the creep behavior of wood cantilever loaded at free end during drying. Wood Fiber Sci. 37(3) :521-534.

Mustapha.M(2013) Mise en oeuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : Polymère thermoplastique renforcé par des fibres de Doum. Thèse Ph.D, Université Mohammed V - Agdal, Faculté des sciences, Maroc.

-N-

NF EN 196-1.(2000) : Méthodes d'essais des ciments, Détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15-471).

NF EN 197-1.(2000) : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciments courants (indice de classement P15-101-1).

NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons, Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement P18-211).

-O-

OUATTARA Souleymane(2013) Recherche de briques légères : conception et caractérisation de briques crues à base d'argile et de sciure de bois, stabilisées au ciment Portland. Thèse Ph.D, Côte D'ivoire, unpubl. data.

-P-

P. Dinakar, Pradosh K. Sahoo, G. Sriram.(2013) Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, DOI 10.1007/s40069-013-0045-0.

Pascal Reynaud et Jean-François Gérard(1997) Interfaces dans les composites longues. Paris,HERMES.

Purnell, P., Short, N.R. ; Page, C.L. ; Majumdar A.J., Walton, PL.(1999) Accelerated ageing characteristics of glass-fibre reinforced cement made with new cementitious matrices. In : Composites : Part A 30 (1999) 1073-1080.

-R-

Roux, M., Anquetil, F. (1994) Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment. CTBA. **S. Catinaud.(2000)** Durabilité à long terme des matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines. Thèse Ph.D, Université de Laval, Canada.

-S-

Silva. F.A, Toledo Filho.R.D, Melo Filho.J.A, Rego Fairbairn.E.M.(2010) Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. Construction building and materials, 24(2010) 777-785.

-T-

T.S.R Ayyar, P.K Mirihagalla.(1976) Elephant grass fibers as reinforcing fiber. Magazine of concrete research, Vol. 28, No. 96, 162-167.

Tropix 7(2011a) Fiche de l'essence AYOUS. Disponible sur : <http://tropix.cirad.fr/Fichiers Complementaires/FR/Afrique/AYOUS.pdf> (consulté le 10/04/2016).

Tropix 7(2011b) Fiche de l'essence SAPELLI. Disponible sur : <http://tropix.cirad.fr/Fichiers Complementaires/FR/Afrique/SAPELLI.pdf> (consulté le 10/04/2016).

-Z-

ZAIDI Ali (2014) Étude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement). Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, mécanique appliquée, Algérie.