

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Thèse de Doctorat LMD

Présentée par :

ANES LINDA

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT** en :

Filière : Génie des procédés

Option : Génie des-procédés organiques

Elaboration et caractérisation d'un composite bois-ciment

Devant le jury composé de :

HACHEMI Messaoud	Professeur	UMBB Boumerdes	Président
TAZROUT Mansour	Maître de Conférences A	UMBB Boumerdes	Directeur de thèse
BENOTMANE Benamar	Professeur	UMBB Boumerdes	Examineur
BOURZAM Abdelkrim	Professeur	USTHB Alger	Examineur
KHELOUI Fatma	Maître de Conférences A	UMMTO Tizi Ouzou	Examinatrice

Année Universitaire 2021 - 2022

Dédicaces

JE DÉDIE CETTE THÈSE À

*CEUX QUI ONT BEAUCOUP SACRIFIÉ DE LEUR TEMPS POUR MON BONHEUR ET MA
RÉUSSITE*

AUX ÊTRES LES PLUS CHERS AU MONDE

MES TRÈS CHERS PARENTS : ABDEL MALEK ET DAHOUIA

À MON CHER MARI ALI, POUR SON SOUTIEN ET ENCOURAGEMENT

À MON PETIT ANGE « ADEM » MA SOURCE DE BONHEUR

À MES SŒURS SARRA ET SABRINA, À MON FRÈRE YACINE QUE J'AIME BEAUCOUP

À MA BELLE-MÈRE ET BEAU PÈRE

À MES BELLES-SŒURS ET BEAUX-FRÈRES

À TOUTE MA FAMILLE

À TOUS MES AMIES

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.

REMERCIEMENTS

Dans cet avant-propos, je voudrais montrer toute ma reconnaissance aux personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail, qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années de recherche.

Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans le soutien, l'aide et la contribution de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement et tout particulièrement, mon directeur de thèse, **Dr. Mansour TAZROUT**, pour son soutien, sa patience, ses enseignements et ses conseils dans les moments les plus difficiles et tout au long de cette thèse.

Je remercie vivement **Dr. Alexandre Govin** qui m'a accueilli au sein du laboratoire de l'Ecole des Mines de St-Etienne, pour ses conseils, son aide, ses encouragements pour la réalisation de ce travail.

Je remercie **Pr. Messaoud HACHEMI**, responsable de cette formation Doctorale pour ses encouragements durant mes démarches pour la réalisation de ce travail.

Je remercie tous les membres de l'entreprise « **TRANSBOIS Bejaia** », la DGF de Bejaia, **CETIM Boumerdes ; CNERIB Souidania ; M^{me} Fouzia Mazani** et toute l'équipe du laboratoire de qualité de **groupe (GICA) de Sour El Ghozlane**; ainsi que le **Pr. Abdelbaki BENMOUNAH**, Directeur de l'unité de recherche URMPE et les membres qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants et responsables de la Faculté de Technologie : **Pr. Mohamed SAIDI** Doyen, **Dr. Hammouche AKSAS** chef de Département Génie des procédés...pour toutes les facilitations qu'ils m'avaient accordé.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux honorables membres du Jury qui ont accepté de juger ce travail : **Pr. HACHEMI Messaoud** (Président du jury), **Docteur TAZROUT Mansour** (Directeur de thèse), **Pr. BENOTMANE Benamar** (Examineur), **Pr. BOURZAM Abdelkrim** (Examineur), **Dr. KHELOUI Fatma** (Examinatrice).

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes parents qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études.

Liste des tableaux

Tableau 1: Composition chimique du clinker de ciment Portland (ciment gris).....	15
Tableau 2: Composition minéralogique moyenne du clinker de ciment gris.....	16
Tableau 3: La répartition moyenne des polymères selon l'essence de bois.....	23
Tableau 4: Composition élémentaire du ciment CEM 1 donnée par le cimentier (LAFARGE)	42
Tableau 5: Les différents réactifs utilisés	44
Tableau 6: Formulations pour de composite bois-ciment.	49
Tableau 7: Composition élémentaire du ciment CEM 1 déterminée par fluorescence X (comparaison avec les valeurs du cimentier).....	55
Tableau 8: Composition des phases potentiel par la formule de Bogue (Taylor .1990)	56
Tableau 9: Les résultats de l'analyse granulométrique des particules de bois d'eucalyptus.	61
Tableau 10: Pourcentage d'absorption d'eau par capillarité des différentes teneurs et traitements de bois.	Error! Bookmark not defined.
Tableau 11: Le coefficient de la conductivité thermique et la résistance à la compression de quelques matériaux en fonction de la masse volumique.	102
Tableau 12 : Valeurs des conductivités équivalentes de quelques ions à 25°C (Scm ² /équivalent).....	120
Tableau 13: resultas de la densité de bois et du ciment	121
Tableau 14: Resultats de caractérisation de bois d'eucalyptus.....	122

Liste des figures

Figure 1: Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment	21
Figure 2: Composition chimique du bois (Fengel, D., & Wegener. 2011).....	23
Figure 3: Structure de la molécule de cellulose.....	24
Figure 4: Structure chimique de l O-acétyle-4-O-méthylglucuronoxylane de feuillus.	25
Figure 5: Structure chimique de l O-acétyle-4-O-méthylglucuronoxylane de résineux.....	26
Figure 6: Motifs élémentaires de la lignine	26
Figure 7: Fraction polyphénolique caractéristique : Les tanins pyrogalliques	28
Figure 8: Molécule d'isoprène.....	28
Figure 9: Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois (Natterer, 2004).....	30
Figure 10: Localisation de l'eau dans le bois	31
Figure 11: Méthodes de modification des fibres végétales	33
Figure 12 : Le tronc d'arbre de bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn.	43
Figure 13: Le broyeur industriel utilisé à l'entreprise du trans bois de Béjaia	43
Figure 14: Schéma du calorimètre et de la préparation de l'échantillon.....	45
Figure 15: Analyse thermique du ciment témoin CEMI.....	47

Figure 16: Identification des différentes parties des courbes conductimétriques et pH lors de l'hydratation	48
Figure 17: Schéma de l'hydratation du ciment en milieu dilué	49
Figure 18: montage de flexion 3 points (Laboratoire GICA Sour El Ghozlane).	50
Figure 19: Montage de l'essai de compression (Laboratoire GICA Sour El Ghozlane)..	51
Figure 20: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption par capillarité	52
Figure 21: Appareil CT-METRE de mesure de la conductivité thermique (CNERIB Souidania).....	53
Figure 22: Détermination de la taille des particules par granulométrie laser	57
Figure 23: Schéma d'un extracteur de Soxhlet.....	59
Figure 24: Courbe granulométrique des particules de bois d'eucalyptus.	61
Figure 25: Spectres infrarouges de 4000cm ⁻¹ à 800cm ⁻¹ du bois d'eucalyptus naturel, traité à l'eau bouillante, traité par NaOH.....	63
Figure 26: Évolution du flux de chaleur et de l'énergie dégagée au cours du temps en fonction du dosage en bois naturel.....	67
Figure 27: a,c) Influence du bois traité par l'eau bouillante sur les temps caractéristiques de l'hydratation, b, d) Quantité d'énergie dégagée.	68
Figure 28: a,c) Influence du bois traité par NaOH sur les temps caractéristiques de l'hydratation, b, d) Quantité d'énergie dégagée.	70
Figure 29: Effet de la concentration en bois naturel sur le temps correspondant au maximum de la courbe conductimétrique.....	71
Figure 30: Effet de la concentration en bois naturel sur l'hydratation du ciment en conductimétrie	71
Figure 31: Effet de la concentration en bois naturel et traité à l'eau bouillante sur l'hydratation du ciment en conductimétrie.....	73
Figure 32: Temps de précipitation de la portlandite à différentes teneurs en bois.	73
Figure 33: Effet de la concentration en bois naturel, traité à l'eau bouillante et le bois traité par NaOH sur l'hydratation du ciment en conductimétrie	74
Figure 34: Temps de précipitation de la portlandite à différentes teneurs en bois (BN, BB,BTC).....	75
Figure 35: Courbes DTG de (a) ciment pur (CEMI), (b) CEMI +20% BN.....	77
Figure 36: Évaluation de la teneur en portlandite en fonction du temps	78
Figure 37: Effet de traitement à l'eau bouillante sur la teneur en portlandite.....	78
Figure 38: Effet du traitement chimique par NaOH sur la teneur en portlandite	79
Figure 39: Influence de la teneur en bois sur CaCO ₃ en fonction du temps.	80
Figure 40: Corrélation entre la diminution de la teneur en portlandite et l'augmentation de la carbonatation.....	81
Figure 41: Influence de traitement à l'eau bouillante sur CaCO ₃ en fonction du temps.	82
Figure 42: Corrélation entre la diminution de la teneur en portlandite et l'augmentation de la carbonatation.....	82
Figure 43: Influence de traitement alcalin sur CaCO ₃ en fonction du temps.	83
Figure 44: Corrélation entre la diminution de la teneur en portlandite et l'augmentation de la carbonatation.....	83

Figure 45: influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur la teneur en gypse	84
Figure 46: influence de poudre d'eucalyptus sur la teneur en ettringite	85
Figure 47: influence des traitements de bois sur la teneur en gypse.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 48: Influence des traitements sur la teneur en ettringite	Error! Bookmark not defined.
Figure 49: Influence de la teneur en bois naturel sur la résistance à la compression.	90
Figure 50: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en bois	91
Figure 51: Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois naturel.	92
Figure 52: Influence du traitement à l'eau bouillante sur la résistance à la compression.....	93
Figure 53: Influence du traitement à l'eau bouillante sur la résistance à la flexion	93
Figure 54: Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois bouillie.....	94
Figure 55: Influence du traitement chimique sur la résistance à la compression.	95
Figure 56: Influence du traitement chimique sur la résistance à la flexion.....	96
Figure 57: Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois traité chimiquement.....	96
Figure 58: Évolution de l'absorption capillaire des composites bois-ciment en fonction du temps	98
Figure 59: La conductivité thermique en fonction de concentration en bois nature, traité à l'eau bouillante et le bois traité par NaOH.	100
Figure 60: Module d'élasticité dynamique des composites en fonction de la masse volumique	103
Figure 61: coupe du bois	113
Figure 62: Coupe transversale d'un tronc d'arbre	114
Figure 63: Microstructure du bois : (a) structure cellulaire, (b) ponctuations	116
Figure 64: schéma d'accroissement annuel au niveau des cellules	117
Figure 65: Représentation schématique des différentes couches et structure de la paroi cellulaire	117

Sommaire

Introduction générale	13
Chapitre I : Synthèse bibliographique	15
I. Le ciment	15
I.1. Définition.....	15
I.1.1. Le ciment portland	15
I.2. Hydratation du ciment portland	16
I.2.1. Hydratation des phases pures	17
I.3. Bilan d'hydratation et interaction entre les phases au "jeune âge"	21
II. Le Matériau bois	22
II.1. La composition chimique	23
II.2. Propriétés du bois.....	29
II.2.1. Propriétés physiques	29
II.2.2. Autres propriétés du bois	31
III. Matériaux composites.....	32
III.1. Compatibilité du bois avec le ciment.....	32
III.2. Modification de l'interface fibre-matrice	33
III.2.1. Méthodes physiques	34
III.2.2. Méthodes chimiques.....	35
III.3. Les propriétés mécaniques des composites	36
III.4. Influence du bois sur la prise et durcissement du ciment	37
IV. La Conductivité thermique des mortiers et les techniques de mesures.....	38
VI.1. Introduction	38
VI.2. Modes de transfert thermique	38
VI.3. Quelques techniques de mesure de la conductivité thermique.....	39
VI.3.1. La méthode de la plaque chaude gardée.....	39
VI.3.2. La méthode dite des boîtes	39
VI.3.3. Méthode de CT-METRE.....	39
VI.4. La conductivité thermique des mortiers et des bétons	40
Chapitre II : Étude expérimentale des composites à base de bois d'Eucalyptus	
Camaldulensus Dehn et du coulis de ciment.	42
I. Matériels et Méthodes	42
II. Matériaux utilisés:	42

II.1.	Le Ciment portland:	42
II.1.1.	Données fournies par le cimentier :	42
II.1.2.	Bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dhen	43
II.1.3.	Réactifs:	43
III.	Méthodes expérimentales	44
III.1.	Préparation et traitement de la poudre de bois :	44
III.1.1.	Traitement thermique à l'eau bouillante :	44
III.1.2.	Traitement chimique par NaOH :	44
III.2.	Suivi d'hydratation en milieu concentré	45
III.2.1.	Microcalorimètre isotherme	45
III.2.2.	Préparation de la pâte	46
III.2.3.	Analyse thermogravimétrie (ATG):	46
III.3.	Suivi d'hydratation en milieu diluée par mesure conductimétrique	47
IV.	Caractérisation mécanique des composites bois d'eucalyptus-ciment	49
IV.1.	Préparation des échantillons:	49
IV.2.	Caractérisation mécanique en flexion 3points et en compression	49
V.	La Densité apparente des composites bois-ciment	51
VI.	Essai d'absorption par capillarité	51
VII.	Essai d'absorption d'eau par immersion	52
VIII.	Essai thermique sur le matériau composite	52
IX.	Vitesse de propagation des ondes ultrasonores	53
Chapitre III : Caractérisation des matières premières		55
I.	Le ciment:	55
I.1.	Analyse par spectrométrie de fluorescence X	55
I.2.	Analyse de granulométrie :	56
II.	Bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn	57
II.1.	Caractérisation du bois d'eucalyptus	58
II.1.1.	Caractérisation chimique	58
II.1.2.	Caractérisation physique :	60
II.1.3.	Caractérisation structurale	62
Chapitre IV : Influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur l'hydratation de ciment		65
I.	Effet de bois sur le temps Caractéristique d'hydratation du ciment	65

I.1.	Suivi d'hydratation par calorimétrie isotherme:	65
I.2.	Suivi de l'hydratation du ciment par conductimétrie :	70
I.3.	Conclusion	75
II.	Influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur les différentes phases cimentaire. ...	76
II.1.	Effet de la poudre de bois d'eucalyptus sur l'hydratation des phases silicatées...	76
II.1.1.	Influence sur la portlandite par analyse thermogravimétrie	76
II.1.2.	Influence sur le carbonate de calcium.....	79
II.2.	Influence du bois d'eucalyptus sur l'hydratation des phases aluminates	84
II.2.1.	Influence de la teneur du bois d'eucalyptus naturel sur les teneurs en gypse et ettringite	84
II.2.2.	Influence du traitement à l'eau bouillante et traitement alcalin sur les teneurs en gypse et ettringite	85
II.3.	Conclusion sur l'hydratation des phases aluminates	87
Chapitre V : Étude expérimentale du comportement mécanique et thermique des composites cimentaires à renfort bois.....		89
I.	Étude expérimentale du comportement mécanique des composites bois d'eucalyptus -ciment	89
I.1.	Matériau composite à base de poudre de bois d'eucalyptus naturel.....	89
I.2.	Matériau composite à base de la poudre de bois d'eucalyptus traité à l'eau bouillante	92
I.3.	Matériau composite à base de poudre de bois d'eucalyptus traité par NaOH	94
I.4.	Conclusion	97
II.	Essai d'absorption d'eau par immersion et par capillarité	97
II.1.	Absorption capillaire	97
II.2.	Absorption par immersion	98
III.	Essai thermique sur le matériau composite bois d'eucalyptus -ciment	99
III.1.	Comparaison du matériau composite ciment-bois d'eucalyptus avec d'autres matériaux isolants	101
IV.	Module d'élasticité dynamique	102
Conclusion générale.....		105
Références Bibliographiques		107
Sommaire des annexes		112

Résumé

Dans le but d'économiser l'énergie et préserver l'environnement, la valorisation des ressources renouvelables dans les matériaux de construction sont de plus en plus étudiés.

L'objectif principal de ce travail est d'élaborer un matériau composite à matrice cimentaire et à renfort en bois d'eucalyptus, un matériau innovant dans la construction en Algérie. Il sera utilisé en panneaux isolants afin de réduire les importations. L'avantage économique de ce matériau composite réside principalement dans la valorisation de la matière première locale bois et ciment.

Dans cette étude nous nous sommes concentrés sur le problème d'incompatibilité du bois avec la matrice cimentaire et d'essayer de réduire ce phénomène en utilisant différents traitements du bois.

L'étude expérimentale a porté sur le bois d'eucalyptus à l'état naturel et le bois traité à l'eau bouillante ainsi que le bois traité chimiquement par l'hydroxyde de sodium.

Pour déterminer l'influence du bois sur l'hydratation du ciment, un suivi de la cinétique d'hydratation en milieu concentré et dilué a été réalisé, suivi d'une caractérisation mécanique et thermique du composite élaboré.

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que le bois d'eucalyptus a retardé l'hydratation du ciment et que le traitement à l'eau bouillante n'améliore pas le processus d'hydratation. En revanche, c'est le traitement alcalin qui est le plus efficace au point de vue performances mécaniques notamment la résistance à la flexion. Selon les normes en vigueur, ces composites peuvent être employés dans l'isolation thermique des constructions, notamment, le recouvrement des murs.

Mots clés : Composite bois-ciment / bois d'eucalyptus / Ciment Portland/ traitement thermique / traitement chimique /cinétique d'hydratation /caractérisation mécanique et thermique.

.

ملخص

من أجل توفير الطاقة والحفاظ على البيئة، تتم دراسة تجميع الموارد المتجددة في مواد البناء بشكل متزايد. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير مادة مركبة مع مصفوفة إسمنتية وتقوية بخشب الأوكالبتوس، وهي مادة مبتكرة في البناء في الجزائر. سيتم استخدامه في عزل الألواح لتقليل الواردات. تكمن الميزة الاقتصادية لهذه المادة المركبة بشكل أساسي في لامعتسا الخشب الخام المحلي والأسمنت.

ركزنا في هذه الدراسة على مشكلة و بشخلا نبيديثايميكلا قفاوتلا مدع المصفوفة الأسمنتية ومحاولة الحد من هذه المشكلة لجلاعمد الخشب تغير ارحلاو تميثايميكلا قرطلا فلتخمد.

ركزت الدراسة التجريبية على خشب الأوكالبتوس في حالته الطبيعية والأخشاب المعالجة بالماء المغلي وكذلك الخشب المعالج كيميائياً مويوصلا ديسكورديهد.

لتحديد تأثير الخشب على ترطيب الأسمنت، تم إجراء متابعة حركية التمهيه في الوسط المركز والمخفف، متبوعاً بتوصيف ميكانيكي وحراري للمركب المفصل.

أظهرت نتائج الدراسة التجريبية أن خشب الأوكالبتوس أخر ترطيب الأسمنت ومعالجة الماء المغلي لم يحسن عملية الترطيب. من ناحية أخرى، فإن المعالجة كيميائياً ب NaOH هي الأكثر فعالية من وجهة نظر الأداء الميكانيكي، ولا سيما فيما يتعلق بمقاومة الانحناء. وفقاً للمعايير المعمول بها، يمكن استخدام هذه المركبات في العزل الحراري للإنشاءات، ولا سيما تغطية الجدران.

الكلمات المفتاحية:

مركب الخشب والأسمنت / خشب الأوكالبتوس / الاسمنت البورتلاندي / المعالجة الحرارية / المعالجة الكيميائية / حركات الترطيب / التوصيف الميكانيكي والحراري.

Abstract

In order to save energy and preserve the environment, the valuation of renewable resources in building materials are increasingly studied.

The main objective of this work is to develop a composite material with cement matrix and eucalyptus wood reinforcement, an innovative material in construction in Algeria. It will be used in insulating panels to reduce imports. The economic advantage of this composite material lies mainly in the valorization of the local raw material wood and cement.

In this study we focused on the problem of incompatibility of wood with the cementitious matrix and to try to reduce this problem by using different wood treatments: thermal and chemical.

The experimental study focused on eucalyptus wood in its natural state and wood treated with boiling water as well as wood chemically treated with sodium hydroxide (NaOH).

To determine the influence of wood on the hydration of the cement, a follow-up of the kinetics of hydration in concentrate and dilute medium was carried out, followed by a mechanical and thermal characterization of the elaborated composite.

The results of the experimental study showed that eucalyptus wood delayed cement hydration and boiling water treatment did not improve the hydration process. Whereas, the alkaline treatment was the most effective from the point of view of mechanical performance, in particular the resistance to bending. According to the standards, these composites can be used in the thermal insulation of constructions, in particular, for the covering of walls.

Key words: wood-cement composite / eucalyptus wood / Portland cement /heat treatment / chemical treatment / hydration kinetics / mechanical and thermal characterization

Introduction générale

La valorisation des ressources renouvelables est un des sujets de notre époque. En Algérie, la bois d'Eucalyptus est largement disponible, et occupe une superficie voisine de 500 hectares. Mais ce type de bois est peu valorisé en bois d'œuvre en raison des défauts de séchage. Ces derniers se traduisent par l'effondrement de la structure des cellules, la formation d'ondulation à la surface du bois et l'apparition de fentes internes qui rendent les bois inaptes à l'emploi.

En Algérie, le ciment qui est un élément nécessaire dans la construction occupe une place prépondérante avec une production annuelle de 25 à 30 millions de tonnes.

L'idée d'élaborer des matériaux composites à matrice cimentaire et a renfort végétal n'est pas récente. Ce type de matériau possède beaucoup d'avantages comparés aux fibres d'amiante qui entraînent un risque sur la santé : le faible coût, utilisation d'une matière renouvelable, et une élaboration plus sécurisée pour la santé.

L'objectif de notre recherche est l'élaboration et la caractérisation d'un nouveau matériau composite à matrice cimentaire renforcée par le bois d'Eucalyptus *camaldulensis* Dehn, et d'élucider les mécanismes d'interaction, entre un renfort végétal et une matrice cimentaire, et d'optimiser la compatibilité chimique entre ces deux matériaux. Cette recherche repose sur la connaissance du comportement du bois en milieu cimentaire alcalin et déterminer le degré des modifications apportées par le bois d'eucalyptus sur la cinétique d'hydratation, ainsi qu'une étude des performances mécaniques et thermiques des composites bois d'Eucalyptus-ciment.

Ce manuscrit comporte cinq chapitres :

Le premier chapitre : Est consacré à l'étude bibliographique sur le ciment, le bois et les matériaux composites.

Le deuxième chapitre : ont Présentes les matériaux utilisés, et les techniques expérimentales mises en œuvre dans cette étude.

Le troisième chapitre : Est consacré à la caractérisation des matières premières : bois d'eucalyptus et ciment.

Le quatrième chapitre : Consacré au suivi de la cinétique d'hydratation du ciment et à la

détermination de l'influence du bois sur la prise du ciment en milieu dilué et concentré.

Le cinquième chapitre : consacré à l'étude des performances mécaniques et thermiques des composites élaborés.

Enfin, une conclusion générale est présentée sur l'étude expérimentale du composite cimentaire à renfort en bois.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I. Le ciment

I.1. Définition

Le ciment est une poudre minérale, qui mélangée à de l'eau forme une masse plastique, facile à façonner, fait prise avec le temps et durcissement progressif avec augmentation de la résistance. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique.

I.1.1. Le ciment portland

Le ciment portland fait partie des ciments les plus répandus dans l'industrie de la construction, il est constitué essentiellement d'une roche synthétique appelée « clinker » et de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) ; la teneur en clinker est au minimum de 95%. La préparation de ce type de ciment consiste à mélanger de manière homogène de calcaire (80%) et (20%) d'argile ou kaolin ; ensuite le mélange (le cru) est calciné à 1450°C pour former le clinker.

En s'approchant de cette zone, les granulats sont successivement déshydratés, décarbonatés (par départ de gaz carbonique contenu dans le calcaire). La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1: Composition chimique du clinker de ciment Portland (ciment gris)

Minéral	Silicate tricalcique	Silicate bicalcique	Aluminate tricalcique	Alumino-ferrite tétracalcique
Formule chimique	$3CaO.SiO_2$	$2CaO.SiO_2$	$3CaO.Al_2O_3$	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$
Notation cimentaire	C3S	C2S	C3A	C3AF
Proportion en masse	60-75 %	10-20%	8-12%	8-12%

Pour produire du ciment, les nodules du clinker, le principal constituant est très finement co-broyé avec du gypse ($CaSO_4.2H_2O$) et éventuellement d'autres éléments minéraux.

L'ensemble est alors broyé dans des broyeurs à boulets à la finesse désirée pour le type de ciment produit, généralement la granulométrie de la poudre de ciment varie de moins d'1 μm à 100 μm .

Une notation simplifiée est couramment employée dans la chimie cimentaire pour désigner les différentes formules chimiques : $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$, $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$, $\text{SO}_3 = \text{S}^-$ et $\text{CO}_2 = \text{C}^-$.

Tableau 2:Composition minéralogique moyenne du clinker de ciment gris (Stutzman, 2004)

Oxydes	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
Teneurs massiques moyennes	62-67%	19-25%	2-9 %	1-5 %	0-3 %	1-3 %	0.6%	0.2 %

Les quatre phases minérales du tableau (2), issues de la combinaison chimique de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2) l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3) sont : l'alite (C_3S) ; bélite (C_2S) ; sont deux solutions solides de silicate de calcium et deux phases aluminates : l'aluminate tricalcique (C_3A) et Alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF). Les aluminates constituent une phase interstitielle entre les plus gros cristaux de silicates (Dunstetter, 2006)

Pour la plupart des clinkers, les quatre phases minéralogiques seront présentes, mais dans le cas du clinker de ciment blanc, l'alumino ferrite tétracalcique est réduite au minimum et, si possible, totalement éliminée, car le fer, qui est une partie essentielle de la phase, colore le clinker de ciment.

I.2.Hydratation du ciment portland

Le ciment est un système multi composant, ce qui rend son processus d'hydratation assez complexe. Par définition l'hydratation du ciment est une série de réactions chimiques individuelles qui se déroulent à la fois en parallèle et successivement. Le processus est responsable de la transformation du béton d'une suspension visqueuse en un élément rigide et solide durable, qui s'accompagne par une libération de chaleur et une modification chimique et physico-mécanique du système, notamment la prise et le durcissement (Bentz 2008)

La progression de la cinétique d'hydratation est influencée par plusieurs facteurs :

- La distribution granulométrique des grains de ciment

- Le rapport Eau/Ciment
- La température de durcissement
- La présence d'adjuvants chimiques, c'est-à-dire de substances chimiques ajoutées en petites quantités pour modifier le taux d'hydratation et les propriétés de la pâte de ciment
- La présence d'additifs, c'est-à-dire de matériaux mélangés au ciment en plus grande quantité, tels que des granulés de haut fourneau : les scories ou les cendres volantes pulvérisées (Beaudoin and Odler 2019)

Selon la théorie de LE CHATELIER (1887), le phénomène de prise se décompose en 3 étapes :

- **La dissolution** : l'eau de gâchage et sous-saturée des phases anhydres qui peuvent alors se dissoudre.
- La formation **de solutions sursaturées** par rapport aux différents hydrates : la dissolution des composés anhydres entraîne un enrichissement en calcium, silicium, sulfates, aluminium et alcalins.
- **La précipitation et la cristallisation** de ces hydrates dans les espaces inter granulaires.

I.2.1.Hydratation des phases pures

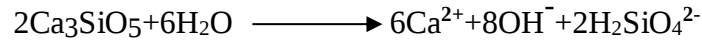
I.2.1.1.Hydratation des phases silicates

Le silicate tricalcique est la phase la plus abondante du ciment portland, et qui domine le processus d'hydratation, en particulier aux premiers âges. Plusieurs recherches ont porté sur leur hydratation (Janosik 2005)(Galynker and Still 1982) (Beaudoin and Odler. 2019), c'est le principal constituant du ciment suite à l'importance de l'hydratation des C3S sur la prise et le durcissement de la pâte.

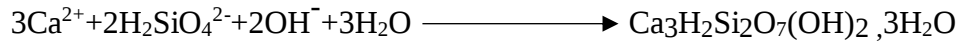
Le processus d'hydratation du silicate tricalcique constitue un phénomène continu qui présente la particularité de se dérouler avec des vitesses de réaction très variables.

Ces cinétiques différentes conduisent à distinguer quatre périodes successives.

- **La période initiale** : correspond au contact des C3S avec les molécules d'eau. Il se forme des ions silicates $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, calcium Ca^{2+} , et hydroxydes OH^- selon la réaction :

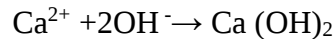


Après quelques secondes, la solution est sursaturée par rapport au CSH qui précipite en feuillets enroulés formant des fibres tubulaires, suivant la réaction :



Dans une période de temps très courte les ions silicates atteignent une valeur maximale qui correspond au moment où la vitesse de précipitation devient plus grande que la vitesse de dissolution du C3S. L'évolution du flux thermique indique que la vitesse de dissolution décroît très rapidement du fait de l'élévation rapide de pH causée par la libération des ions OH^- en présence d'ions Ca^{+2} ; la solution devient saturée par rapport à la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$; le pH atteint alors des valeurs de l'ordre de 12.8.

Equation de formation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$:



Durant cette phase initiale, il se produit une compétition entre les germinations de CSH et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Tant que la teneur en ions silicates de la solution dépasse une certaine valeur limite, la germination de CSH l'emporte.

- **Période d'induction :**

Les réactions précédentes se poursuivent pendant quelques heures à vitesse décroissante du fait du PH élevé et de la forte concentration en calcium. Durant cette période d'induction, dite dormante, la quantité de CSH formée est très faible. Une membrane de CSH se forme autour des grains des C3S anhydres et empêche leur hydratation. Les réactions d'hydratation sont alors limitées par la diffusion de l'eau vers les grains anhydres et des ions vers la solution interstitielle.

La portlandite ne peut pas croître du fait de l'adsorption de silicates sur la surface. La période d'induction se termine lorsque la sursaturation par rapport à la portlandite est suffisante pour contrer ces phénomènes.

Lorsque le taux de sursaturation par rapport à la portlandite atteint une valeur limite, celle-ci précipite en cristaux plats hexagonaux entre les grains de C3S partiellement hydratés.

Il se produit alors un effet de pompe à calcium à la surface des grains en cours de réaction qui accélère leur dissolution. Cette cinétique aboutit à la fin de la période d'induction, elle est caractérisée par une décroissance de la concentration en calcium et en ions OH ainsi que par l'augmentation du flux thermique.

- **Période de prise**

Les réactions auparavant en sommeil reprennent de la vitesse. Il y a formation abondante d'hydrates avec consommation d'eau. Peu à peu, la pâte acquiert de la consistance, c'est le début de la prise qui se produit lorsque le taux de réaction atteint une valeur de l'ordre de 5%.

Les fibres de CSH et les cristaux de portlandite s'enchevêtrent et remplissent les pores. Le matériau se densifie et devient solide. La vitesse de réaction atteint son maximum pour un taux d'avancement d'environ 30% correspondant au maximum du flux thermique.

- **Période de durcissement**

Après une dizaine d'heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de silicate anhydre atteint une épaisseur suffisante pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau. La réaction d'hydratation du C3S se poursuit alors à vitesse de plus en plus réduite tant qu'il subsiste de l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcis. L'hydratation totale n'est atteinte qu'après de nombreuses années. En pratique, après quelques mois, la consommation d'eau entraînée par la réaction d'hydratation conduit à une dessiccation progressive des pores capillaires : ce sont les phénomènes d'auto-dessiccation mis en lumière par LE CHATELIER (1887). La résistance mécanique de la pâte durcie croît comme le degré d'hydratation, donc de plus en plus lentement avec le temps.

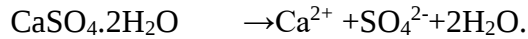
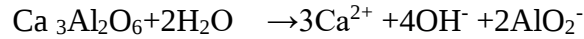
L'hydratation du C3S est caractérisée par un signal exothermique de courte durée important dans les expériences de calorimétrie isothermique.

I.2.1.2.Hydratation des aluminates de calcium

Le contact des C3A avec l'eau engendre une réaction auto catalytique accélérée, qui conduit à la formation d'aluminates hydratés. L'addition de gypse permet de réguler l'hydratation ; au lieu d'une réaction accélérée, il se produit une réaction lente à cinétique variable, similaire à celle du silicate tricalcique. La durée des différentes étapes réactionnelles est cependant plus grande dans le cas de l'aluminate.

- **Phase initiale**

Mélangés à l'eau au cours du gâchage, l'aluminate tricalcique et le gypse se dissolvent rapidement selon les réactions :



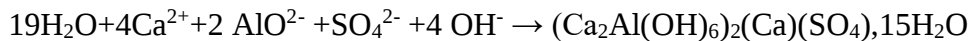
Cette réaction exothermique conduit à la formation d'une solution très saturée par rapport aux hydrates. Les ions se combinent quasi instantanément en formant des cristaux de trisulfoaluminate de calcium hydraté, plus connu sous le nom d'ettringite ou de sel de Candlot, selon la réaction :



- **Epuisement du gypse**

La formation d'ettringite consomme trois moles de sulfate de calcium par mole d'aluminium tricalcique. La teneur en gypse est inférieure à cette proportion stœchiométrique : le C₃A est généralement en excès par rapport au gypse.

Après 10 à 24 heures, donc bien après la prise proprement dite de ciment, le gypse est totalement consommé. La concentration en ions sulfate chute ; la solution devient sous-saturée par rapport à l'ettringite. Cette dernière va alors se dissoudre et devenir la nouvelle source d'ions sulfate pour former avec l'aluminate excédentaire un nouveau composé, le monosulfoaluminate de calcium hydraté, note MSA, selon la réaction :



Cette réaction, qui consomme deux moles d'aluminate par mole d'ettringite, provoque une dissolution rapide de l'aluminate anhydre qui alimente la solution en ions aluminate.

- **Réaction à long terme**

La suite de la séquence des réactions des aluminates dépend des proportions initiales d'aluminate et de gypse qui déterminent le rapport stœchiométrique des produits formés à l'équilibre.

Généralement, le ciment portland contient 8 à 12 % d'aluminate et 5% de gypse, soit un rapport molaire d'environ 0.80. Ce rapport correspond à un mélange de mono sulfate et d'aluminate tétra calcique hydraté ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6)_2$ ou à une solution solide du même type dans laquelle des sulfates se substituent aux ions OH^- .

Dans le béton, l'ettringite est totalement transformée en monosulfoaluminate en quelques semaines. Au-delà d'un mois, le monosulfoaluminate réagit lentement avec l'aluminate et l'aluminoferrite excédentaires pour donner un aluminoferrite de calcium hydraté complexe incluant des ions aluminate, ferrate, sulfate, calcium et hydroxyle.

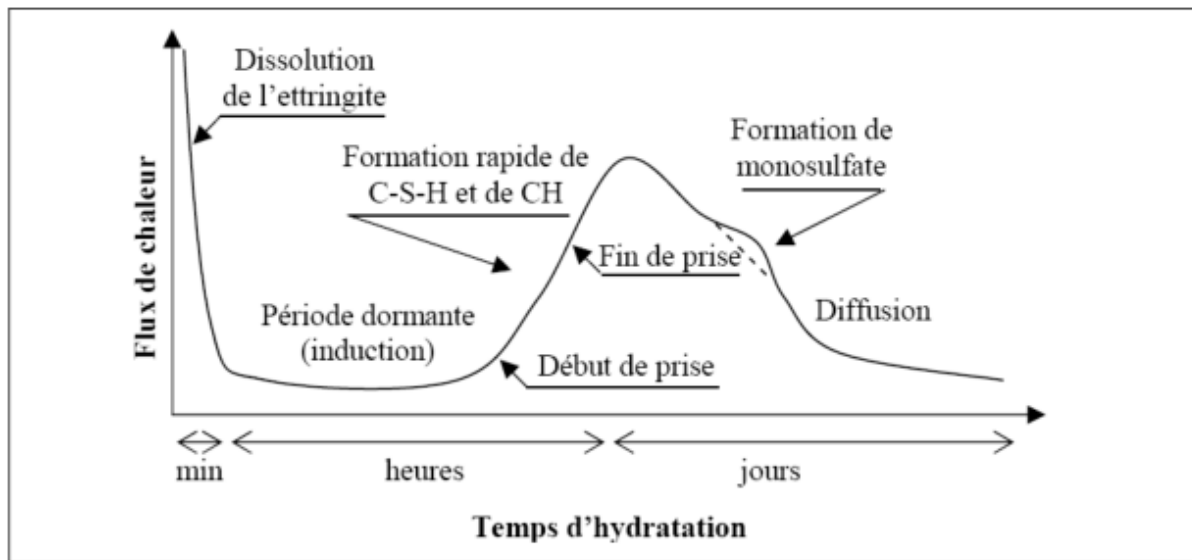


Figure 1: Représentation schématique de la courbe calorimétrique de l'hydratation du ciment (Neville , 2000)

I.2.1.3.Hydratation des autres constituants

Les processus d'hydratation des autres constituants du ciment sont analogues à ceux qui ont été décrit précédemment. Le silicate bicalcique C_2S se comporte comme le silicate tricalcique en donnant les mêmes CSH ; l'hydratation de C_4AF aboutit à la formation de sulfoaluminate et sulfoferrate de calcium hydraté similaires à ceux produits par l'aluminate tricalcique. La vitesse d'hydratation de ces composés est cependant plus faible que celles du C_3S et du C_3A .

I.3.Bilan d'hydratation et interaction entre les phases au "jeune âge"

La réaction d'hydratation du ciment aux jeune âge correspond d'une manière générale à la réactivité des deux phases C_3S et le C_3A . Au cours du processus d'hydratation, les interactions

chimiques et thermiques entre les différentes phases permettent la prise et le développement des propriétés mécaniques du matériau cimentaire.

Dans la première période juste après la gâchée (0-15min), la dissolution des ions silicates, calcium, aluminates, sulfates, et alcalins, et du fait que les silicates et les aluminates sont fortement solubles en milieu alcalin, leurs concentrations vont augmenter avec le pH de la solution.

Après l'étape de dissolution des espèces, la formation des hydrates va être gouvernée par un processus de germination. Celle-ci peut se produire de manière homogène à partir de la solution ou de manière hétérogène à l'interface solide-solution.

La dissolution de C3S libère des ions calcium et hydroxyde ce qui augmente la conductivité de la solution. Le C-S-H est le premier hydrate formé, malgré la forte sursaturation en chaux, c'est la germination de C-S-H qui l'emporte. En même temps la dissolution de l'aluminate tricalcique fournit des ions qui vont réagir avec les sulfates du gypse pour former de l'ettringite.

Ensuite vient la période d'accélération du processus d'hydratation provoqué par la précipitation de la portlandite. Lorsque le gypse est épuisé, l'excès de C3A va réagir avec les sulfates provenant de l'ettringite, cette réaction est rapide et très exothermique.

Le processus d'hydratation de chaque phase cimentaire est perturbé par plusieurs facteurs , par exemple la chaleur d'hydratation des aluminates provoque une accélération de la prise et de durcissement des silicates.

II. Le Matériau bois

Le bois est un composite stratifié naturel fibreux composé d'un ensemble complexe de cellules, de forme de tubes, qui assure une fonction biologique pendant la vie de l'arbre. L'ensemble de tissus de bois présente une consistance plus ou moins dure formant la masse principale du tronc des arbres. Les caractéristiques structurelles du bois sont orientées selon les trois principales directions de croissance, à savoir longitudinale-parallèle à l'axe de l'arbre, radiale et tangentielle par rapport aux cernes annuels.

On distingue d'une manière générale deux catégories d'arbres (Natterer, 2004) correspondant à deux groupes végétaux : les résineux et les feuillus. La structure elle-même peut être décrite à trois échelles : macroscopique, microscopique (cellule) et ultra

microscopique au niveau des parois cellulaires. La description de l'anatomie du bois est exposée en annexe A.

II.1.La composition chimique

Quelle que soit l'espèce, le bois anhydre est constitué de carbone (environ 50%), d'oxygène (42%), d'hydrogène (6%), et d'autres atomes en quantité moindre (1%). Selon les essences ou le milieu d'origine, le bois aura des teneurs variables en matières minérales : Ca, Mg, Na, Pt, Fe, Si, P, Setc.

Au niveau moléculaire, le bois est composé de trois biopolymères : la cellulose (40-50%), la lignine (15-35%) et les hémicelluloses (20% d'environ).Des minéraux, des extractibles tels que les cires s'ajoutent à ces trois composants principaux. La figure (2) montre les principaux composants chimiques du bois.

La teneur moyenne des différents constituants varie en fonction des essences de bois. La répartition moyenne des polymères selon l'essence de bois est présentée dans le tableau 3.

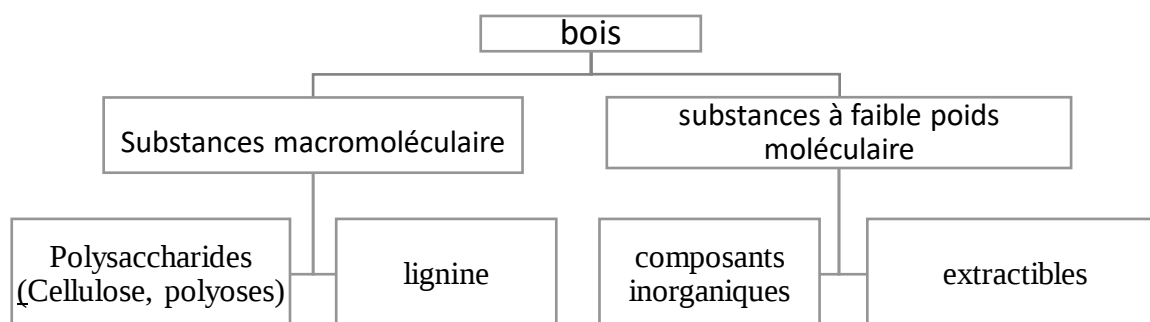


Figure 2:Composition chimique du bois (Fengel, D., & Wegener 2011)

Tableau 3: Répartition moyenne des polymères selon l'essence de bois (Sjostrom ,1993) .

Constituants	Feuillus (%)	Résineux (%)
Cellulose	40-50	40-50
Polyoses (hémicelluloses)	25-35	20-30
Lignines	20-30	25-35
Extractibles	0.5-10	0.5-10
Composants inorganiques	0.1-10	0.1-1

- **La cellulose**

La cellulose est la base structurelle des cellules végétales, c'est la substance naturelle la plus importante produite par l'organisme vivant, une substance fibreuse, dure insoluble dans l'eau que l'on trouve dans les parois cellulaires protectrices des plantes, en particulier dans les tiges, les troncs et toutes les parties ligneuses de la plante.

La cellulose est le principal constituant, qui contribue à la solidité et à la rigidité de la biomasse, en formant des liaisons hydrogène intermoléculaire et la liaison de Van der Waals entre la cellulose et avec des constituants d'hémicellulose. Le pourcentage de chaque composant varie en fonction de l'espèce végétale et des types de tissus, où les fibres à forte teneur en cellulose sont généralement plus résistantes.

La cellulose est d'une chaîne linéaire constituée d'unités β -D glucopyranose, liées entre elles par des liaisons glucosidiques en β 1 $\rightarrow$ 4 ;(R.J.Moon.2011) le monomère ; nommé anhydroglucopyranose obtenu par déshydratation et formé par deux unités β -D-glucopyranose. La structure de la cellulose est illustrée dans la figure 3.

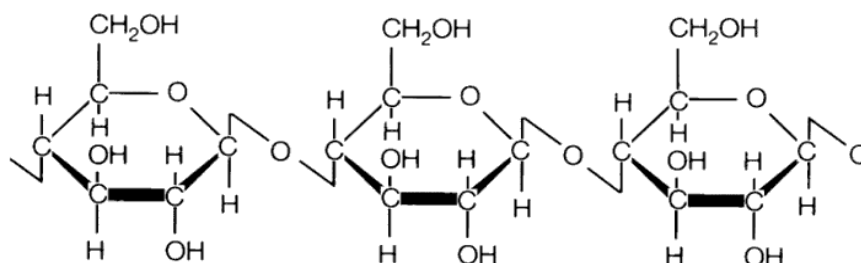


Figure 3:Structure de la molécule de cellulose

- **Les hémicelluloses**

L'hémicellulose est un polymère hétérogène composé de nombreux sucres, tels que le xylose, l'arabinose, le mannose et le galactose, qui sont des sucres en C5 et C6. Les hémicelluloses sont des polysaccharides des parois cellulaires des plantes. Généralement, ils constituent 20-30% des parois cellulaires, mais dans certaines plantes annuelles, ils peuvent être présents en quantités plus importantes.

L'hémicellulose a une chaîne plus courte que la cellulose, avec un DP compris entre 150 et 200 et sont constituées de différentes unités de sucre hétéroglycane et sont moins ramifiées par rapport à la cellulose. Selon cette composition, l'hémicellulose se dégrade plus facilement au cours du processus d'hydrolyse. De plus, l'hémicellulose a une structure amorphe qui facilite son hydrolyse (McKenzie .2012).

La nature des hémicelluloses de l'arbre diffère entre les résineux et les feuillus :

Les hémicelluloses des feuillus sont constituées principalement des xylanes (20 à 25 %). Il s'agit d'un polymère linéaire d'unités D-xylopyranose liées en β -1,4, avec des ramifications irrégulières. Le squelette décrit une hélice gauche en ruban à 3 unités xylose par tour avec deux unités successives décalées d'un angle de 120° , la chaîne principale comporte des groupes d'acides 4-O-méthylglucuronique par liaison glycosidique α - (1, 4) (figure 4).

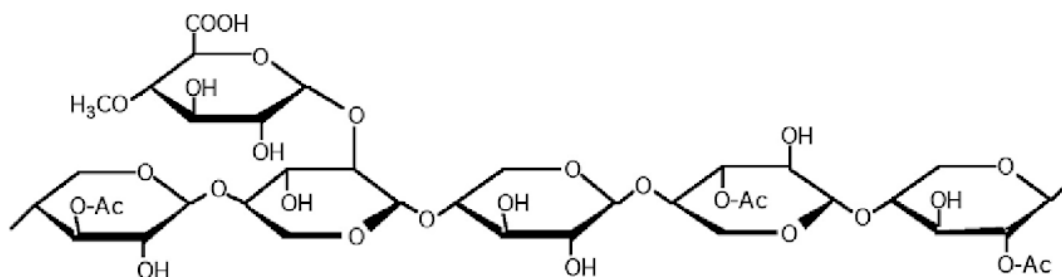


Figure 4: Structure chimique de l O-acétyle-4-O-méthylglucuronoxylane de feuillus.

La quantité de xylose varie en fonction du type de plante dont elle provient. Les hémicelluloses des feuillus ont aussi un caractère acide pouvant avoir un effet négatif vis-à-vis des réactions d'hydratation du ciment, puisqu'elle pourrait faire diminuer l'alcalinité en réagissant avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) contenu dans la solution interstitielle.

Le xylane des résineux diffère de ceux des feuillus par l'absence de groupes latéraux O-acétyle et la présence d'unités d'arabinofuranose liées par liaison glycosidique α -(1-4) à la chaîne principale en plus des groupes d'acide 4-O-méthylglucuronique (figure 5), leur pourcentage dans le bois varie entre 7 et 14 % pour les espèces courantes.

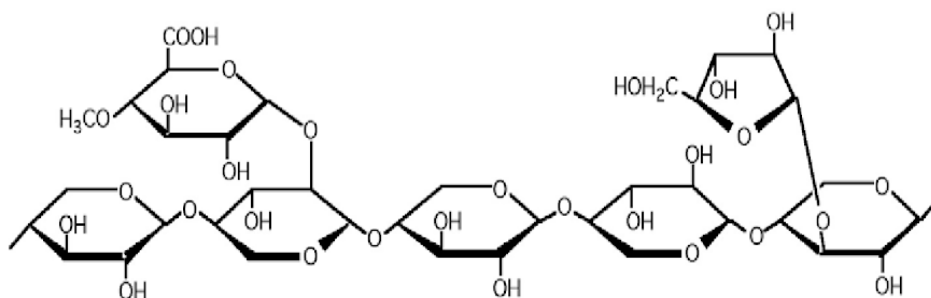


Figure 5: Structure chimique de l'O-acétyle-4-O-méthylglucuronoxylane de résineux

- **La lignine**

La lignine est un polymère complexe à trois dimensions constituées d'unités phénylpropane et présente une structure tridimensionnelle amorphe. On la trouve dans les plantes ; son poids moléculaire dans le bois est très élevé et difficile à mesurer.

La lignine comprend 20% à 35% de la biomasse, est un biopolymère phénolique composé de trois unités phénylpropanoïdes: l'alcool p-coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool synapylique. Ces trois monolignols sont également identifiés respectivement comme étant des motifs p-hydroxyphényl (H) guaiacyl (G) et syringyle (S) (Fernández-Rodríguez et al. 2018)

La structure de la lignine, diffère selon les résineux et les feuillus, n'est pas encore complètement élucidée, du fait de la difficulté à isoler la lignine sans la dégrader. La lignine des résineux est la lignine guaiacyl (polymérisation de l'alcool coniférylique) et celle des feuillus est la lignine guaiacyl-syringyle (co-polymère d'alcool coniférylique et synapylique). La figure 6, montre les motifs élémentaires de la lignine.

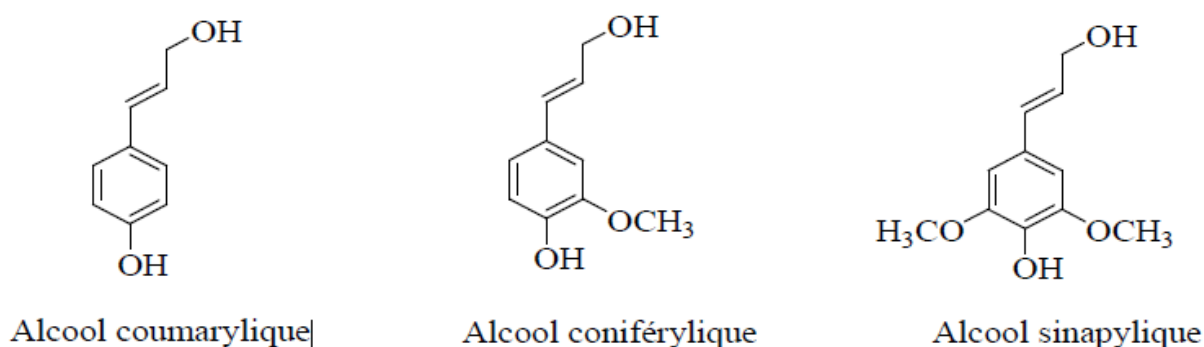


Figure 6: Motifs élémentaires de la lignine (van der KERK 1976)

- **Les composés libres (les extractibles)**

Une grande variété de composants du bois, bien que représentant habituellement une fraction mineure, sont solubles dans les solvants organiques neutres ou dans l'eau. Ils s'appellent des extractibles. Comme leur nom l'indique, les produits extractibles également appelés produits naturels sont des produits chimiques dans le bois qui peuvent être extraits à l'aide de solvants. Les produits d'extraction sont un groupe de produits chimiques des parois cellulaires composées principalement de graisses, d'acides gras, d'alcool gras, de phénols, de terpènes, de stéroïdes, d'acides résiniques mineurs.

Ces produits existent sous la forme de monomères, de dimères et de polymères. En général, les feuillus ont un contenu extractif plus élevé que les résineux. La plupart des produits d'extraction dans les résineux et les feuillus sont situés dans le bois de cœur, et certains sont responsables de la couleur, de l'odeur et de la durabilité du bois (Rowell, 2005)

- **Les tanins**

Les tanins sont des composés phénoliques présents dans la nature sous forme polymérisée. Dans les végétaux, il existe en effet deux types de polymères phénoliques ayant des propriétés complexes : les tanins et les lignines.

Les tanins sont des polyphénols ayant des poids ; moléculaires compris entre 500 et 3.000. Les tanins peuvent se diviser en deux classes :

- Les pyrogalliques (ou hydrolysables).
- Les catéchiques (ou condensés non hydrolysables).

Les tanins pyrogalliques donnent après hydrolyse à chaud à l'aide de solutions acides étendues, une fraction glucidique (glucose) et une fraction polyphénolique (acide gallique, acide digallique ou ellagique) (Doat ,1978) (Figure 7).

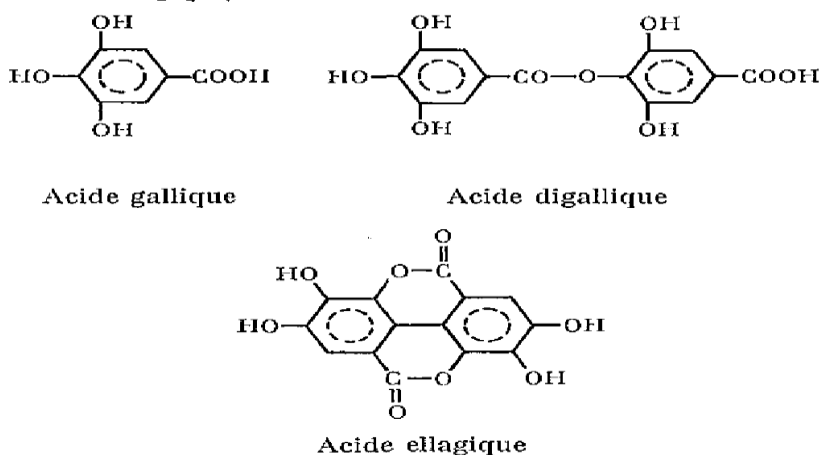


Figure 7:Fraction polyphénolique caractéristique : Les tanins pyrogalliques (Doat ,1978)

- **Les terpènes et les terpénoides :**

Les terpènes sont des substances généralement lipophiles qui dérivent d'une entité simple à cinq atomes de carbone. Tous les terpènes ainsi que leurs dérivés possèdent en commun une voie de biosynthèse appelée, de par l'intervention d'un intermédiaire clé, voie de l'acide mèvalonique.

En raison de l'importance considérable des composés terpéniques, la voie de l'acide mèvalonique est un aspect de métabolisme végétal qui mérite une attention particulière. Les composés et dérivés terpéniques peuvent être considérés en tant que polymères du 5-carbone 2- méthyl-1.3-butadiène ou isoprène (Hopkins ,2003)

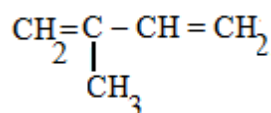


Figure 8:Molécule d'isoprène

II.2.Propriétés du bois

II.2.1.Propriétés physiques

Le bois est un matériau particulier dont ses propriétés varient en fonction de différents facteurs. Les arbres étant des êtres naturels, vivants et très diversifiés. Les propriétés physiques sont les caractéristiques quantitatives du bois et son comportement aux influences extérieures autres que les forces appliquées, et qui varient selon le type d'essence, les conditions de croissance et le taux d'humidité. Le bois est considéré comme étant un matériau anisotrope, c'est à dire que ses propriétés varient selon les différentes directions.

II.2.1.1.Hygroscopicité

L'eau est un agent essentiel dans le processus de la vie d'un arbre. Il est présent en grande quantité dans l'arbre et dans la bille verte après l'abattage. La teneur en humidité est l'aptitude que possède le bois à absorber ou résorber l'humidité (hygroscopicité) est une caractéristique majeure qui vise ce matériau. Les fluctuations de la teneur en eau peuvent entrainer des variations dimensionnelles appelées retrait ou gonflement. Dans certaines conditions environnantes l'humidité est responsable de la pourriture du bois.

On parle généralement de taux d'humidité, dite humidité à sec (par rapport au bois anhydre, c'est-à-dire le bois à 0% d'humidité). Son calcul est le suivant :

$$H = \frac{(\text{Masse. bois. humide} - \text{Masse. bois. anhydre})}{(\text{Masse. bois. anhydre})} * 100$$

$$H = \frac{\text{Masse . eau. dans. bois}}{\text{Masse. bois. anhydre}} * 100$$

L'évolution de la teneur en eau dans le bois, représentée schématiquement dans la figure 9, montre qu'en partant de l'état anhydre ($H=0\%$), l'augmentation de la teneur en eau se fait dans un premier temps par absorption du liquide dans la matière ligneuse (Natterer. 2004). Ce n'est qu'après avoir atteint le point de saturation des fibres ($H_{PSF}=30\%$), que l'eau s'accumule dans les pores du bois. Les variations dimensionnelles sont essentiellement dépendantes des variations hygroscopiques au-dessous du point de saturation du bois ($H \leq 30\%$). Au-dessus, les variations dimensionnelles deviennent négligeables.

Plusieurs types d'eau circulent dans les bois massifs quelle qu'en soit l'essence ou la densité. Les différents états de l'eau dans le bois sont :

- **Etat anhydre ($H=0\%$)** : il n'y a pas de l'eau libre ou liée dans le bois ; il ne reste que l'eau de constitution qui est contenue dans la matière ligneuse. Il n'en est pas tenu compte dans la mesure du taux d'humidité, elle ne disparaît que si l'on brûle le bois (Leboucher 2014). Cet état instable est obtenu par dessiccation totale de bois dans l'étuve à 103 degrés Celsius.
- **L'eau liée ou (d'imprégnation)** : $0\% < H < 30\%$ cette eau est dite liée au bois par l'intermédiaire d'une liaison sur les sites hydroxyles disponibles ($-OH$) des celluloses ou lignines. L'énergie nécessaire pour enlever cette eau est l'énergie du séchage. Le bois mis en œuvre ayant une teneur en eau se situant entre 8 et 20% est toujours dans la plage hygroscopique de l'eau liée.
- **Point de saturation des fibres PSF** : $H = 30\%$, c'est un point particulier, variant d'une essence à l'autre, où toutes les fibres sont saturées d'eau.
- **L'eau libre** : $H > 30\%$ cette eau remplit les pores du bois (figure 10) et peut conduire à la saturation totale.

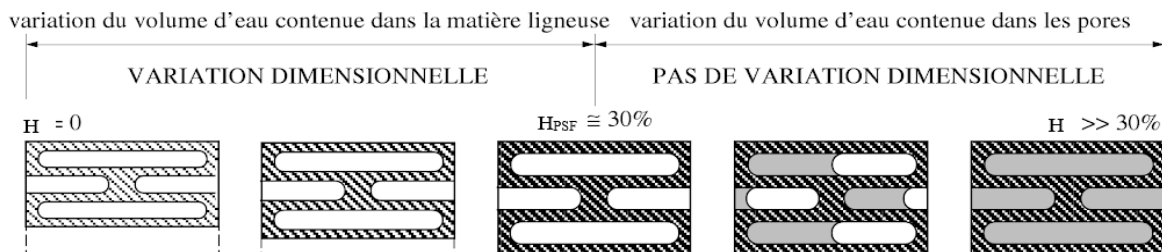


Figure 9: Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois (Natterer, 2004).

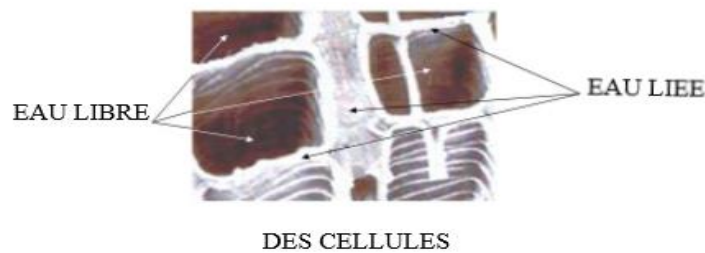


Figure 10: Localisation de l'eau dans le bois

II.2.2. Autres propriétés du bois

➤ Mécaniques

On entend par les propriétés mécaniques celles qui ont un rapport à l'usage que l'on fait du bois.

- **La flexibilité :**

Propriétés du bois à reprendre sa forme lorsqu'il a fléchi. Les résineux possèdent une résistance relativement forte, on les emploie beaucoup en charpente, les nœuds et l'humidité diminuent la résistance.

- **La résistance à la traction :**

Propriétés du bois à résister à l'allongement dans le sens des fibres. C'est dans ce sens que le bois offre le plus de résistance.

- **Résistance à la compression :**

Propriété du bois à résister à ; plus le bois est lourd, plus il offre de résistance.

- **La dureté :**

Propriétés du bois à résister au coup des outils à l'enfoncement de clous, à l'usure.

III. Matériaux composites cimentaires

Les composites cimentaires à renfort bois sont devenus un sujet intéressant dans la construction, grâce à leur application structurale dans le domaine.

Le but recherché est d'obtenir des matériaux de haute performance mécanique renforcés par des fibres végétales qui peuvent remplacer les fibres d'amiante, dont les effets dangereux pour la santé.

Bien que la poudre de bois ait les avantages de faible densité, faible coût et faible énergie, mais le problème principal est l'incompatibilité de la matière végétale avec la matrice cimentaire ce qui limite leur fabrication. Le phénomène d'incompatibilité est dû à la sensibilité de bois aux conditions humides, ce qui conduit à des variations dimensionnelles et par conséquent la diminution des performances mécaniques du matériau. L'utilisation de ces composites dans les constructions est souvent limitée à cause de ce problème. Différentes méthodes d'amélioration sont utilisées afin de réduire l'incompatibilité bois-ciment et améliorer les propriétés mécaniques, physiques du composite.

III.1. Compatibilité du bois avec le ciment

Dans le domaine de la recherche sur les composites bois-ciment, le terme compatibilité signifie le degré de prise du ciment après mélange avec de l'eau et du bois. En termes généraux, si le processus chimique de durcissement du ciment n'est pas perturbé, ou seulement dans une faible mesure, par la présence de bois, on dit que ce ciment et ce bois sont compatibles ; en revanche, si la présence de bois a perturbé le durcissement du ciment, on dit qu'ils sont incompatibles. (Na, B. et al, 2014)

Il est bien entendu que le problème de l'incompatibilité entre les fibres végétales et le ciment dus à certains produits chimiques solubles du bois arrêtent l'hydratation du ciment lorsqu'ils sont attaqués par le milieu cimentaire alcalin, ce qui se traduit par une dégradation de la résistance mécanique des composites bois-ciment. Les sucres et les amidons présents dans le bois ont été identifiés comme les composés les plus critiques causant l'incompatibilité entre le bois et le ciment, surtout dans les bois résineux (Zhengtian, L Moslemi 1986) .De plus, les composants acides et alcalins, qui pénètrent dans le bois, endommagent la structure du bois, ce qui entraînera une perte supplémentaire de résistance et affaiblissement de la ténacité des

composites, les produits de dégradation, qui sont développés par la pénétration de l'acide et les composants alcalins, influenceront l'hydratation du ciment.

III.2.Modification de l'interface fibre-matrice

Afin de réduire l'incompatibilité entre les fibres végétales et la matrice cimentaire, plusieurs techniques sont employées dans le but d'améliorer l'adhésion entre la matrice et le renfort par la création de liaisons qui n'existaient pas auparavant. Deux catégories de traitement peuvent être utilisés : les méthodes de traitement physique et chimique.

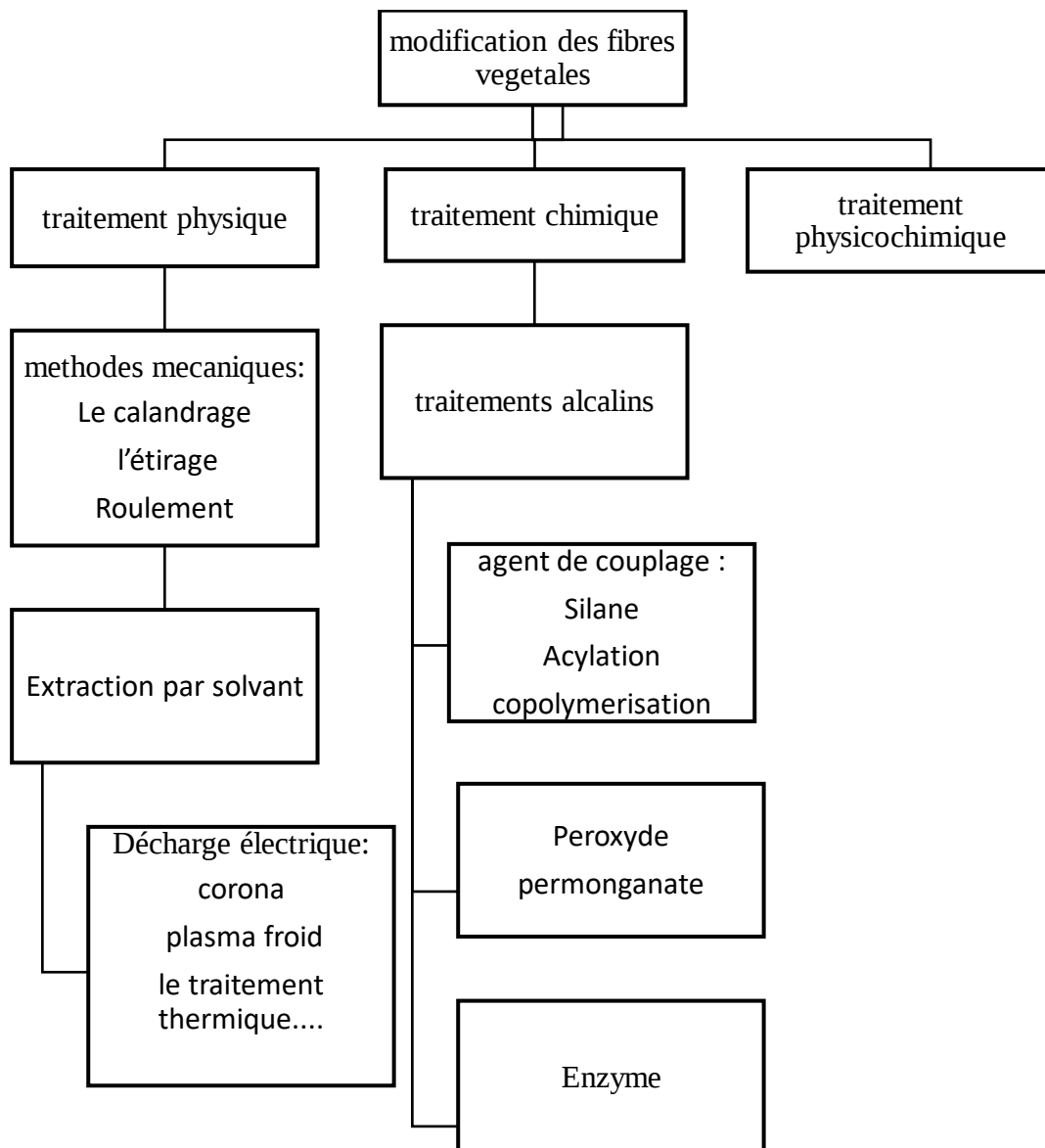


Figure 11:Méthodes de modification des fibres végétales (Ahmad, Hamid, and Osman 2019)

III.2.1.Méthodes physiques

Les traitements physiques des fibres végétales permettent une modification des propriétés structurales et surfaciques de la fibre. Ainsi, ils influencent les liaisons mécaniques sans modifier la composition chimique des composites avec la matrice cimentaire. Le calandrage, l'étirage, le traitement thermique, le traitement corona, plasma froid...sont les différentes techniques utilisées.

Les différentes techniques de traitement apportent d'avantage en termes d'augmentation des propriétés de surface, une cristallinité élevée et une amélioration de la durabilité, ils agissent sur la fibre végétale soit par : le gonflement du bois, soit l'enrobage de la fibre.

Les techniques physiques très répandus des fibres végétales sont :

- **Traitements par décharges électriques (corona, plasmas froids) :**

Le traitement par décharges électriques est très répandu dans le domaine des composites, c'est une méthode appropriée pour améliorer la compatibilité entre les fibres hydrophiles et la matrice par le biais d'une rugosité de la surface et de la structure des fibres, avec un faible impact l'environnemental.

Le traitement corona c'est une technique d'activation de surface par oxydation, lors d'activation la concentration des groupements aldéhyde augmente (Yahiaoui Lamia. 2011). Les traitements par les plasmas exercent le même type d'action que le traitement corona ; ils modifient la surface des fibres sans affecter les propriétés intrinsèques du matériau. De plus, la technique ne nécessite pas l'utilisation de solvant et les temps de traitement sont courts (Ahmad, Hamid, and Osman. 2019).

La modification des fibres végétales avec le traitement plasma dépend du gaz impliqué dans le processus. L'oxygène entraîne la formation de groupes plutôt acides, alors que l'azote ou l'ammoniaque entraîne la formation de groupes plutôt basiques.

- **Traitement mécanique**

L'étirement, le calandrage, le roulage sont les méthodes de traitement mécanique classique pour le traitement de surface des fibres végétales. Le processus d'étirement a le potentiel de donner une résistance maximale à la traction mais il peut également déclencher un allongement dans lequel la fibre pourrait glisser pendant l'étirement, ce qui entraîne un allongement et une

extension supplémentaire (Rozali et al. 2019). Le processus de calandrage avec la pression exercée par les rouleaux de la calandre permet d'uniformiser la fibre en feuille continue qui peut être découpée et ajustée à la taille souhaitée (Gupta and Gupta. 2019).

Le laminage et l'estampage sont utilisés pour obtenir une séparation des faisceaux et d'améliorer la dispersabilité, l'adhérence avec les matrices polymères.

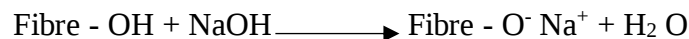
III.2.2.Méthodes chimiques

Le traitement chimique permet de modifier et d'activer la structure des fibres en utilisant un groupe hydroxyle qui peut changer la composition du matériau en introduisant de nouveaux éléments qui peuvent interagir avec la matrice (Ragoubi et al. 2010). L'utilisation des produits chimiques pour la modification des fibres augmenteront les propriétés mécaniques de la fibre et la résistance des composites ciment-fibre végétale et améliorer l'adhérence.

- **Traitement alcalin**

Le traitement alcalin est un des traitements chimiques le plus couramment utilisé pour la modification des fibres végétales. Les principales modifications causées par ce traitement donnent une augmentation de la rugosité de la surface en brisant la liaison hydrogène interne ce qui modifie la cristallinité, la structure des cellules unitaires, l'absorption d'humidité et l'orientation des fibrilles, améliorant ainsi les propriétés mécaniques de la fibre. Pendant le traitement, la lignine, la cire et les huiles qui dissimulent la surface extérieure de la paroi cellulaire en fibres sera partiellement enlevée, ainsi que l'hémicellulose (Ahmad, Hamid, and Osman 2019).

Le traitement des fibres végétales par l'hydroxyde de sodium (NaOH) conduit à l'ionisation du groupe hydroxyle selon la formule suivante :(Cao et al,2006)



- **Traitement de silane**

Les silanes sont des agents de couplage, largement utilisés pour favoriser l'adhésion dans les composites à base de fibres de verre et de matrices polymériques ainsi que les composites bois-ciment. Divers types de silanes modifient efficacement les propriétés de l'interface fibre naturelle - matrice polymère, bois - polypropylène, élastomères chargés de minéraux...

Le traitement des fibres végétales par un agent d'accouplement silane « SiH_4 » engendre des modifications moléculaires, il réduit le nombre des groupes hydroxyles de la cellulose dans l'interface des composites. Dans le milieu humide le groupe alkyl hydrolysable conduit à la formation du silanol qui réagit avec le groupe hydroxyle de la fibre végétale en formant des liaisons covalentes stables à la paroi cellulaire. Par conséquent, ce type de traitement permet le gonflement de la fibre avec création d'un réseau réticulé entre la fibre et la matrice.

III.3. Propriétés mécaniques des composites

Le renforcement des matériaux de construction par des fibres végétales permet d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leur résistance à la traction, à la fissuration et leur ductilité.

Le mortier ordinaire peut être considéré comme un matériau quasi-fragile dont la résistance à la traction est rapidement atteinte. Les fissures se propagent dans la matrice et conduisent à une rupture fragile. L'ajout de fibres végétales forment des ponts sur les fissures et permettent la transmission des efforts de traction à travers les fissures, ce qui permet de compenser cette faiblesse relative du matériau et de mieux contrôler son comportement à la fissuration. Les fibres donnent au ciment un caractère ductile et augmentent sa ténacité.

Sedan a étudié le renforcement de ciment avec les fibres de chanvre et leur influence sur les propriétés mécaniques des composites. Il indique que la résistance en flexion de ces matériaux évolue d'environ de 4,9 MPa pour le ciment à 6.8 MPa pour un composite contenant 16% en masse de fibres. Ainsi que Les fibres de chanvre confèrent aux matériaux composites une grande souplesse (Sedan. 2007).

Touloum et al. Ont étudié le renforcement d'une matrice cimentaire avec le bois dattier. Les résultats montrent un gain des propriétés mécaniques notamment pour les composites à 8% en bois. Au-delà d'une teneur de 8%, la structure poreuse du tissu végétal décroît leur performance mécanique (Touloum et al. 2016).

Plusieurs techniques ont été examinées afin d'accroître les performances mécaniques et améliorer l'adhésion à l'interface des composites. Le traitement de fibres par des agents hydrophobes permet de bloquer l'absorption d'eau par le bois, d'où réduction de la porosité du composite et l'augmentation de la résistance à la compression.

Achour et al. Ont étudié l'effet de traitement alcalin des fibres de doum et les fibres de diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) sur les propriétés mécaniques et thermiques des composites. Les résultats montrent que le traitement avec la soude permet d'éliminer des parties amorphes à la surface des fibres et d'augmenter leur cristallinité ce qui améliore la rigidité du mortier. Ont montré que l'incorporation de ces fibres réduit la conductivité thermique et augmente l'absorption de la chaleur des composites (Achour. 2017).

III.4.Influence du bois sur la prise et durcissement du ciment

Dans les années 60, l'ajout de renfort bois à une matrice cimentaire augmente le temps de prise et voire parfois une inhibition totale de prise du ciment. La détermination des facteurs influençant la prise se pose depuis plus de trente ans.

Plusieurs travaux de recherche ont étudié l'association de la matière végétale avec une matrice minérale. Nous citons parmi elles, les recherches de Moslemi et al. (Moslemi.1984) sur des essences américaines, (Alberto et al,2001) sur des essences du Mozambique et de (Wilding et al.1984) sur les adjuvants organiques et inorganiques sur la prise du ciment .

Cependant, le problème d'incompatibilité entre le bois et le ciment reste un frein au développement de ces matériaux composites. Cette incompatibilité se traduit par un retard de prise et une modification de la cinétique d'hydratation du ciment due à la présence des substances inhibitrices libérées par le matériau lignocellulosique.

Bruere (Bruere, 1966) a montré que les extractifs de bois provoquent les différents degrés d'inhibition du ciment. Les sucres et les amidons présents dans le bois considéré comme les composés les plus critiques provoquant une incompatibilité entre le bois et le ciment, surtout dans le bois résineux. En effet, le taux de sucres libres dépend de la partie de l'arbre, le bois de cœur est riche en sucre comparativement à l'aubier. Fargette a confirmé cette observation et il a montré que les extractibles de l'écorce possèdent un fort pouvoir retardateur (Fargette. C. 1995)

Certains auteurs ont montré que la période d'abattage affecte la nature et la teneur en extractibles. Par exemple, Biblis a déterminé que les temps de prise du ciment hydraté en présence d'aubier coupé au printemps sont supérieurs à ceux observés avec le même bois « southern pine » coupé en hiver (Biblis EJ, 1968) Ceci a été expliqué par les sucres présents en plus grande quantité dans la sève de printemps.

À l'heure actuelle, pour comprendre le mécanisme précis de l'effet inhibiteur du bois sur l'hydratation du ciment plusieurs recherches ont été réalisées. D'après Reading, le milieu cimentaire alcalin attaque les hémicelluloses de bois et les convertit en oligosaccharides solubles qui inhiberaient le durcissement du ciment (Reading.T.J 1985) Miller et Moslemi, ont proposé deux mécanismes. Premièrement, les extractifs composés de divers composés organiques forment des complexes avec les ions métalliques présents dans la solution de ciment. Cela diminue la concentration d'ions Ca^{2+} dans le ciment et perturbe éventuellement l'équilibre de la solution, ce qui retarde le début de la nucléation du gel $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et CSH ((Miller, D.P., Moslemi 1991), Un autre mécanisme suggéré est que les composés organiques forment une fine couche d'adsorption à la surface du ciment et ralentissent le processus d'hydratation.

IV. La Conductivité thermique des mortiers et les techniques de mesures

VI.1.Introduction

La croissance énergétique dans le monde, et le besoin d'améliorer le niveau de vie, ont suscité l'industrie du bâtiment à améliorer les propriétés thermiques des matériaux de construction. L'isolation thermique est la technologie la plus efficace pour optimiser les problèmes énergétiques dans le secteur du bâtiment, mais le transfert thermique en béton est compliqué et plusieurs facteurs influent sur leur conductivité thermique tels que les agrégats, la porosité et le degré d'humidité.

VI.2.Modes de transfert thermique

Par définition la température est la vitesse d'agitation des particules élémentaires de la matière et on appelle un transfert thermique l'échange de chaleur entre deux corps de températures différentes. Il existe 3 grandes familles de transfert de chaleur qui sont : la conduction, la convection et le rayonnement.

- **La conduction**

Le transfert de chaleur par conduction traduit l'échange d'énergie (chaleur) par propagation à l'intérieur d'un solide sans déplacement de matière, il concerne les solides et les fluides.

- **Par convection**

Le transfert de chaleur par convection s'effectue entre un solide immobile et un fluide qui traverse la paroi de ce solide. Les molécules directement au contact d'une surface solide absorbent ou cèdent la chaleur suivant les températures respectives de la surface et des fluides. Ce mécanisme de transfert s'effectue par la loi de newton.

- **Par rayonnement**

Ce mode de transfert s'effectue entre deux corps séparés (émetteur et récepteur) par émissions des ondes.

VI.3.Quelques techniques de mesure de la conductivité thermique

Plusieurs méthodes, expérimentales et théoriques peuvent être utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux d'isolation dans le domaine du bâtiment.

VI.3.1.La méthode de la plaque chaude gardée

La plaque chaude gardée est un appareillage qui permet de mesurer la conductivité thermique et la résistance thermique. Le flux de chaleur thermique est constant avec les plans isothermes parallèles à travers deux éprouvettes du matériau situées de part et d'autre de la plaque chaude gardée. Cette méthode est appliquée pour les matériaux homogènes et les mélanges granuleux compacts avec une granulométrie sensiblement continue. L'inconvénient majeur de cette méthode est que le montage est très délicat à réaliser et le temps d'expérimentation est très long (18 heures).

VI.3.2.La méthode dite des boites

L'appareil est constitué d'un thermostat qui maintient une basse température, d'une ou plusieurs boites (jusqu' à trois) revêtues sur leurs parties internes d'un matériau dont on connaît parfaitement le coefficient d'échange thermique et comportant sur leurs faces supérieures un film chauffant et son alimentation est reliée à une console de mesure.

VI.3.3.Méthode de CT-METRE

Pour notre étude, nous avons utilisé un appareil de mesure disponible au niveau du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) dit CT METRE (Chapitre II).

Le CT METRE se compose de deux éléments :

- L'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester,
- La sonde chargée de transmettre la puissance de chauffage et de recueillir la température induite.

Cet appareil est conçu pour évaluer les caractéristiques thermiques de matériaux solides tels que la brique, la terre, le béton cellulaire ou le bitume.

VI.4.La conductivité thermique des mortiers et des bétons

La conductivité thermique des bétons et des mortiers dépend de plusieurs facteurs :

- Le type du ciment,
- Le pourcentage de granulats fins
- Le rapport E/C,
- La température
- L'état d'échantillon (sec ou humide)

(KooK-Han et al,2003) ont montré que le pourcentage des granulats et l'humidité sont les deux facteurs principaux qui affectent la conductivité thermique et que les granulats fins donnent une faible conductivité thermique du fait que les agrégats fins sont uniformément distribués dans la matrice. Ils ont constaté également que l'augmentation de la température et le rapport E/C contribuent à la diminution de la conductivité thermique. En autres ainsi que la substitution des ciments par les cendres volantes diminue le coefficient de la conductivité thermique.

Chapitre II : Étude expérimentale des composites à base de bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn et du coulis de ciment.

Chapitre II : Étude expérimentale des composites à base de bois d'*Eucalyptus Camaldulensis* Dehn et du coulis de ciment.

I. Matériels et Méthodes

L'addition de bois dans la matrice cimentaire impose une bonne connaissance du processus d'hydratation du ciment en présence du bois et le comportement physique et mécanique de ces matériaux.

Ce chapitre présente l'ensemble des techniques mises en œuvre pour évaluer la cinétique d'hydratation du ciment en présence de bois *d'eucalyptus Camaldulensis Dehn* : conductimétrie, calorimétrie isotherme, analyse thermique (TG-DTG) sont utilisées. Les différentes méthodes classiques d'études des propriétés mécaniques des composites cimentaires élaborés, sont également présentées.

II. Matériaux utilisés:

II.1. Le Ciment portland:

II.1.1. Données fournies par le cimentier :

Le ciment utilisé le CEM I 52,5 (norme NA442/2013), est fabriqué par LAFARGE à l'usine de Sour el Ghoulane (Bouira). La composition chimique élémentaire fournie par le cimentier est consignée dans le tableau 4. Ce ciment est obtenu par le mélange de clinker broyé avec le gypse, dans des proportions très précises. Ce produit convient : pour les grands travaux nécessitant une haute résistance avec un délai de décoffrage court.

Tableau 4:Composition élémentaire du ciment CEM 1 donnée par le cimentier (LAFARGE)

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO _L	K ₂ O	Na ₂ O
%	21.27	4.54	4.06	63.42	2.68	1.98	1.64	0.59	0.10

II.1.2. Bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn

Le matériel végétal est issu d'un arbre de bois *d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn*, provenant de la forêt d'Alksar à Bejaia. Après abattage de l'arbre et tronçonnage à la scie à chaîne en tronçons de 1 mètre de longueur (Figure 12) ; ces derniers sont transportés à l'Entreprise Transbois de Bejaia ; pour être écorcés manuellement et broyés à l'aide d'un broyeur industriel (Figure13).



Figure 12 : Le tronc d'arbre de bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn.



Figure 13: Le broyeur industriel utilisé à l'entreprise du trans bois de Béjaia

Après le broyage ; la poudre de bois obtenue, est tamisée, manuellement à travers différents tamis en récupérant la poudre de granulométrie $\geq 400 \mu\text{m}$; ensuite la poudre a été étuvée pendant 48 h à la température de $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

II.1.3. Réactifs:

Les produits chimiques utilisés dans cette étude sont présentés dans le tableau 5. Ce sont les produits de traitement chimique de bois et de de l'arrêt d'hydratation.

Tableau 5: Les différents réactifs utilisés

	Formule	Masse molaire (g/mol)
Acides: acide acétique	CH ₃ COOH	60.05
Base : Soude	NaOH	40.00
Alcool : propanol-2	C ₃ H ₈ O	60,1
Diethyle Oxyde	(C ₂ H ₅) ₂ O	74,12

III. Méthodes expérimentales

III.1. Préparation et traitement de la poudre de bois :

Après le broyage et le tamisage, le bois d'eucalyptus a été utilisé sous trois formes.

- Le bois d'eucalyptus naturel.
- Le bois d'eucalyptus traité thermiquement à l'eau bouillante.
- Le bois d'eucalyptus traité chimiquement par NaOH.

III.1.1. Traitement thermique à l'eau bouillante :

Pour réduire l'incompatibilité entre la matière végétale et la matrice cimentaire, différentes recherches bibliographiques ont opté pour le traitement du renfort. Une des stratégies d'amélioration de l'adhésion bois-ciment est le traitement thermique. Ce traitement consiste à la mise en ébullition de la poudre de bois d'eucalyptus dans un récipient pendant quatre heures, puis égoutté et rincé à l'eau abondante afin d'éliminer les substances organiques libérées par le bois en présence d'eau.

III.1.2. Traitement chimique par NaOH :

La poudre de bois est immergée durant 6 h dans une solution alcaline à 5% de concentration. La solution est préparée par dissolution de 50g de pastilles d'hydroxyde de sodium NaOH dans 1 litre d'eau distillée. À des concentrations plus élevées le traitement provoque une rupture de la chaîne cellulosique ce qui entraîne la dégradation des propriétés mécaniques. La neutralisation de l'effet de la soude caustique (NaOH) sur la poudre de bois nécessite le rinçage avec de l'acide acétique dilué puis avec de l'eau distillée.

Enfin la poudre de bois est séchée à la température ambiante pendant 24 h et étuvées à 103° C jusqu'à la stabilisation de sa masse

III.2. Suivi d'hydratation en milieu concentré

III.2.1. Microcalorimètre isotherme

Cette technique permet de mesurer le dégagement de la chaleur lors des réactions d'hydratation du ciment. L'appareil utilisé est un biocalorimètre (B.C.P. Arion), constitué de deux fluxmètres semi-conducteurs et un écran thermo régulé, permettant de manipuler d'une manière isotherme à 25°C (Figure 14). L'appareillage est équipé d'un moteur électrique permettant l'agitation de l'échantillon par l'intermédiaire d'une pale. Un système d'acquisition affiche le flux de chaleur dégagé en fonction du temps d'hydratation.

L'échantillon est obtenu par gâchage de 50g de ciment avec 20 ml d'eau (rapport Eau/Ciment =0.4). La teneur de la poudre du bois varie de 5%,10%,15% ; 20%. Puis le mélange subit un malaxage de 300 tr/mn pendant 3 mn à l'aide d'un malaxeur de paillasse ; équipé d'une pale d'agitation. Une partie de ce mélange est introduite dans une cellule en aluminium. L'échantillon est ensuite pesé, à $t=5$ mn, la cellule est insérée dans le calorimètre. La masse réelle de ciment sera calculée pour déterminer ultérieurement la chaleur dégagée en joules par gramme (J/g).

La méthode calorimétrique renseigne de manière globale sur la vitesse d'hydratation du ciment. Le détail du mécanisme est étudié par analyse thermogravimétrique

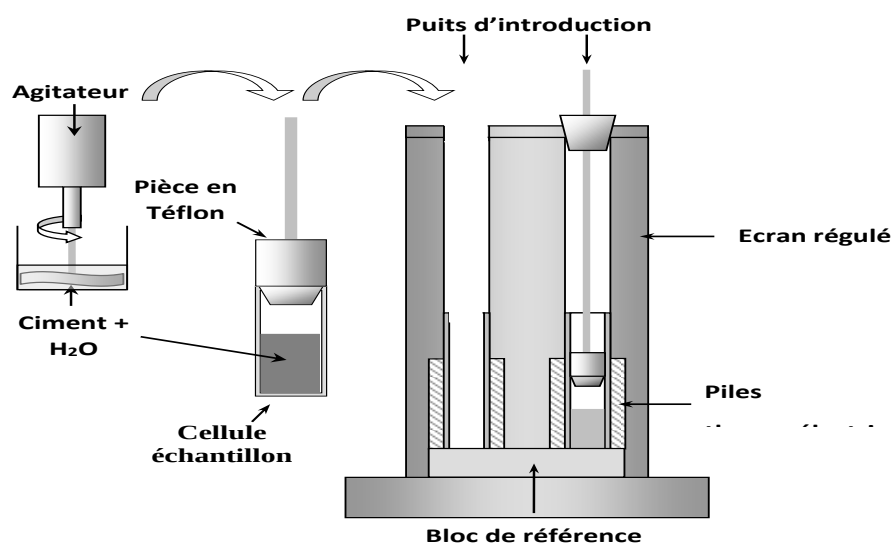


Figure 14: Schéma du calorimètre et de la préparation de l'échantillon

III.2.2.Préparation de la pâte

La pâte de ciment est préparée avec un rapport E/C constant ($E/C = 0,4$), puis malaxage selon la norme EN 196-1 à l'aide d'un malaxeur CAD MLX60 ; pour homogénéiser le mélange ciment-poudre du bois (% massique B/C = 10 % et 20 %). La pâte est ensuite déposée dans des cubes en PVC et stockée dans un dessiccateur à 20°C saturé en vapeur d'eau. Les cubes sont cassés et broyés aux instants souhaités. L'hydratation a ensuite été stoppée à différents temps de cure (2 h, 4 h, 8 h, 24 h et 48 h) par échange de solvant. L'échantillon est d'abord démoulé, broyé puis immergé dans 50 ml d'isopropanol pendant 15 min. L'ensemble est ensuite filtré sous vide puis rincé à l'aide de 20 ml d'isopropanol et 20 ml d'éther. Le retentât est étuvé durant 24 h à 40 °C et broyé à 100 μm . Ces échantillons seront utilisés pour l'analyse thermique.

III.2.3.Analyse thermogravimétrie (ATG):

Le dispositif est (SETARAM TG 92-1618) constitué d'une thermobalance. Les analyses sont réalisées sous un flux d'argon sur une masse d'échantillon d'environ $1,58 \pm 0,4$ mg. Le principe consiste à enregistrer les pertes de masse dans un domaine de températures compris entre 30°C et 900°C, ainsi que les transformations endothermiques et exothermiques d'échantillons. Les phénomènes endothermiques correspondent à des pertes d'eau libre ou de l'eau liée ou à une décarbonatation.

Les décompositions des phases contenues dans les matériaux cimentaires dans la plage de température 30–900 °C sont les suivantes :de 30–105 °C : évaporation de l'eau libre et de l'eau physiquement adsorbée à la surface des hydrates. Les deux premiers pics a 110–170 °C correspondant respectivement à la décomposition de l'ettringite du gypse. La quantification de ces deux phases ne sera effectuée que pour des durées inférieures à 8h. Après cette échéance, le pic de décomposition des CSH intervient et chevauche celui de l'ettringite. Les pics suivants a 450–550 °C et a 600–900 °C correspondant respectivement à la déshydratation de la portlandite et décarbonatation du carbonate de calcium. Cette étude permet de réaliser une analyse quantitative des hydrates cimentaires en présence de poudre de bois en fonction de temps d'hydratation afin de les comparer avec l'échantillon témoin.

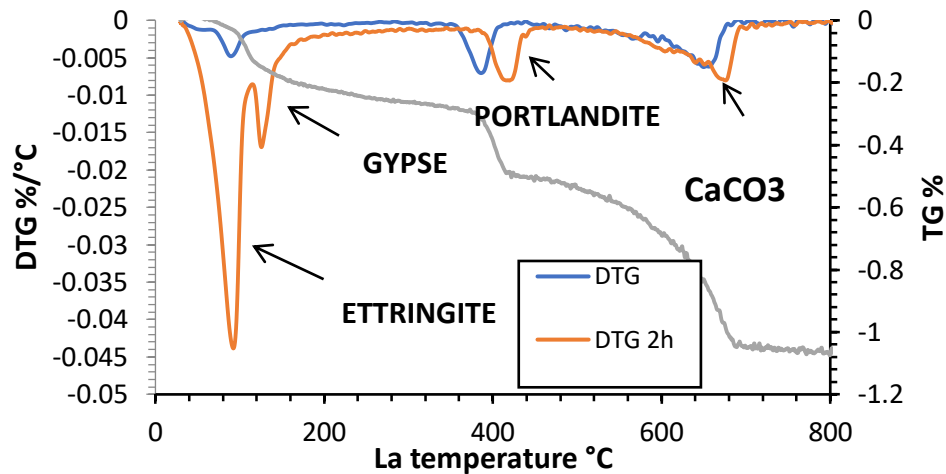


Figure 15: Analyse thermique du ciment témoin CEMI

Sur la courbe DTG, selon SILVA et al. (Silva et al. 2002) Les pourcentages massiques de portlandite et de carbonate de calcium sont calculés à partir des formules suivantes :

$$Q_{\%CH} = (Q\% H_2O) / M_{H_2O} \times M_{CH} \quad Q_{\%CaCO_3} = (Q\% CO_2) / M_{CO_2} \times M_{CaCO_3}$$

$Q_{\%H_2O}$ et $Q_{\%CO_2}$ représentent respectivement la perte de masse d'eau et de CO_2 (en %), M_{H_2O} , M_{CH} , M_{CO_2} et M_{CaCO_3} les masses molaires de l'eau, de la portlandite, du CO_2 et du carbonate de calcium.

III.3. Suivi d'hydratation en milieu dilué par mesure conductimétrique

La théorie pour réaliser les expériences de conductimétrie est donnée en annexe B

Une cellule à double enveloppe remplie d'eau, constituée de trois électrodes circulaires en inox est reliée à un conductimètre CDM 210 (Radiometer). Avant chaque manipulation la cellule est étalonnée à l'aide d'une solution KCl à 0,1 mol/L ($\lambda = 12,88 \text{ mS/cm}$) et thermo statée à 25°C ; la suspension est maintenue continuellement sous agitation magnétique. L'appareil est relié à un système d'acquisition qui permet de suivre et d'enregistrer en fonction du temps l'évolution de la conductivité de la suspension de ciment.

A l'aide d'une fiole jaugée on prépare 100 ml de l'eau distillée thermostatée à 25°C ; et on l'introduit dans la cellule. L'essai se fait en milieu dilué avec un rapport Eau/Ciment = 20. Après

l'acquisition, on insère 5g de ciment dans la cellule préalablement remplie de 100 ml d'eau distillée. Pour déterminer l'influence du bois, on introduit différents pourcentages massiques en bois compris entre 5 et 30 %. Avant son introduction dans la cellule de mesure, le ciment et le bois sont homogénéisés à l'aide d'un turbulいた.

La technique suivie est classique pour caractériser le ciment. De nombreux auteurs, l'ont utilisé : Maximilien et al (Maximilien, P, and Chabannet 1997), GRANDET et al (Grandet 1985), GOVIN et al (Govin et al. 2005) La figure 16, montre l'évolution de la conductivité du ciment dans le milieu dilué.

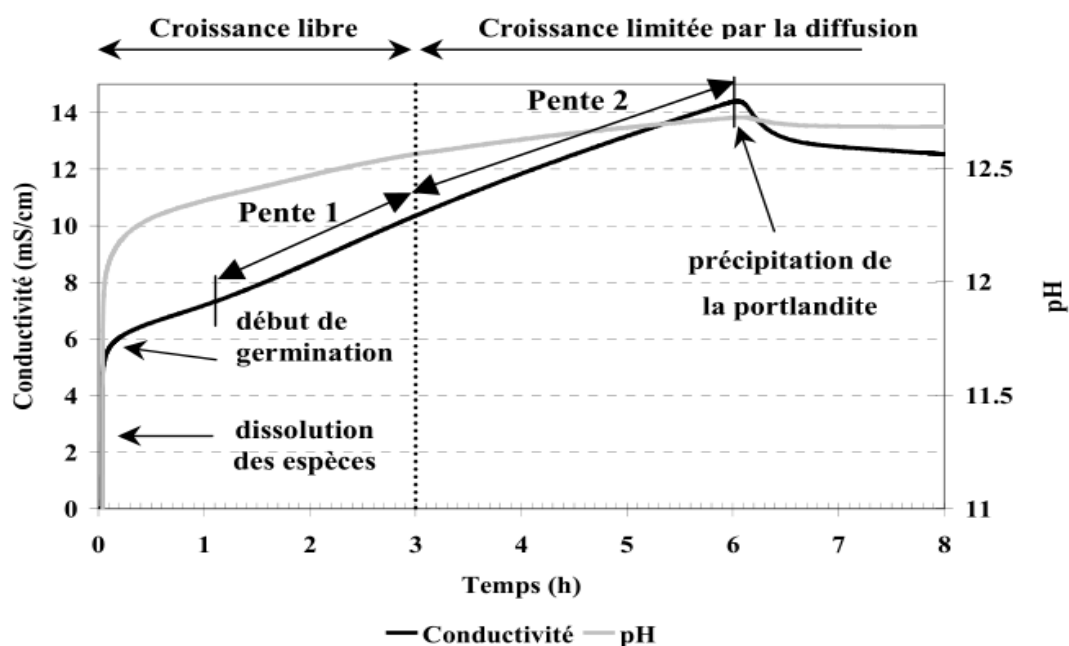


Figure 16: Identification des différentes parties des courbes conductimétriques et pH lors de l'hydratation (Comparet et al. 1997)

L'analyse graphique montre une augmentation instantanée de la conductivité qui indique la dissolution des différents constituants du ciment. Dans un deuxième temps, un infléchissement intervient sur la courbe de conductivité ce qui représente la germination de CSH et l'ettringite. Les silicates de calcium hydratés vont se former en périphérie des grains anhydre, ils apparaissent de manière ponctuelle. A partir de ce moment, la conductivité augmente très lentement puis s'accélère. La croissance est limitée par le nombre de germes, on est dans un régime de croissance libre, lorsque la surface est saturée ; la croissance devient limitée par la diffusion. Lorsque la sursaturation par rapport à la portlandite est atteinte, la portlandite précipite et la conductivité chute. Une compétition entre la dissolution des grains anhydres et la précipitation des hydrates entraîne une diminution progressive de la conductivité (Figure 17).

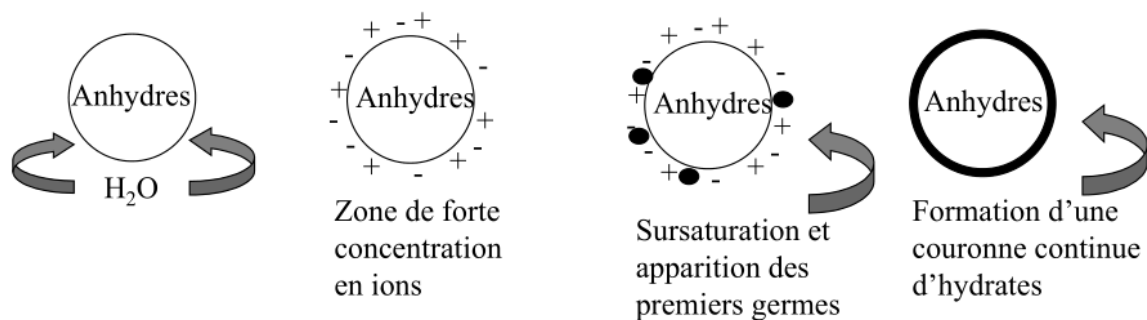


Figure 17: Schéma de l'hydratation du ciment en milieu dilué

IV. Caractérisation mécanique des composites bois d'eucalyptus-ciment

IV.1. Préparation des échantillons:

Avant d'élaborer les composites, la poudre de bois d'eucalyptus a été étuvée à une température $103 \pm 2^\circ\text{C}$, jusqu'à la stabilisation de la masse, les composites bois-ciment ont été confectionnés sur la base de la masse volumique réelle de la poudre de bois qui est de l'ordre de 1260 kg/m^3 .

Tableau 6: Formulations pour de composite bois-ciment.

	CEMI	C+5%	C+10%	C+15%	C+20%
Ciment (g)	1500	1425	1350	1275	1200
Eau (g)	600	600	600	600	600
Bois (g)	0	75	150	225	300

Les composites bois-ciment ont été formulés avec différentes teneurs en bois 0,5,10,15,20% (Tableau 6). Conformément à la norme NF EN 196-1 des échantillons de forme prismatique $40 \times 40 \times 160 \text{ (mm)}$ sont fabriqués et démouler après 24 h, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à $20^\circ\text{C} \pm 01^\circ\text{C}$ jusqu'à la réalisation de l'essai mécanique.

IV.2. Caractérisation mécanique en flexion 3points et en compression

Les essais mécaniques ont réalisé sur la machine d'essai universelle Zwik/Roell (Toni Technique) ; au laboratoire GICA de la cimenterie de Sour El Ghozlane. Les résistances à la

flexion et à la compression des composites ont été évalués selon la norme européenne EN 196-1. Des éprouvettes de dimension $40 \times 40 \times 160$ (mm) ont été testées après 2, 7, 28 jours de durcissement à l'eau. Pour chaque formulation de mélange examinée, les valeurs obtenues correspondent à la moyenne de trois essais.

L'essai de flexion trois points (Figure 18) a été réalisé en premier lieu, suivi de l'essai de compression (Figure 19), effectué sur les demi-prismes issus de l'essai de flexion. L'essai de résistance à la compression de chaque échantillon a été réalisé, et les résultats ont été moyennés.

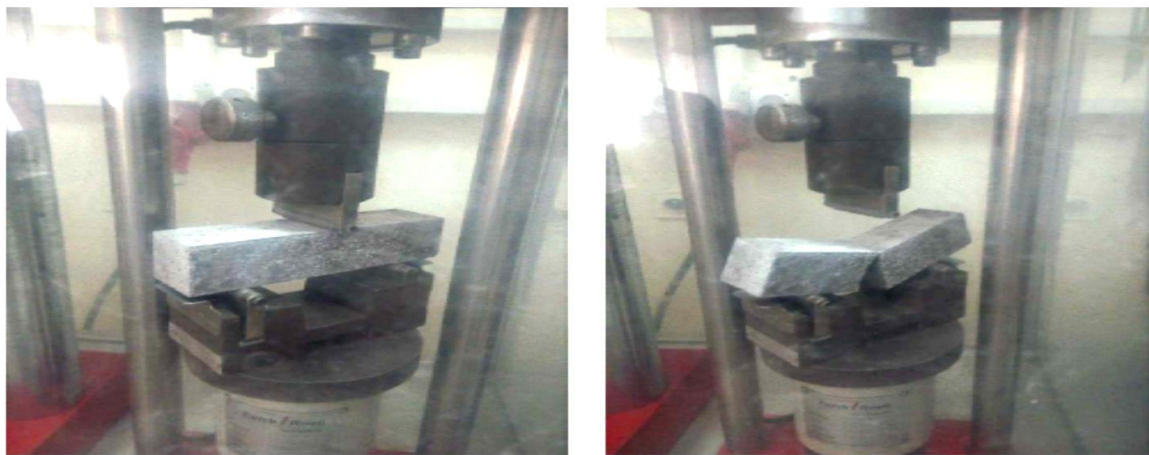


Figure 18: montage de flexion 3 points (Laboratoire GICA Sour El Ghazlane).

La contrainte de flexion et la contrainte de compression sont données par les formules suivantes.

$$R_f = 1.5 * FL/bh^2$$

$$R_c = F_c/S$$

F : la force appliquée (Newton)

L : la distance entre les appuis (millimètre)

h et b : respectivement la hauteur et la largeur de l'éprouvette (millimètre).

R_c : la résistance à la compression (méga pascals)

F_c : la charge maximale à la rupture (newtons)

S: Est l'aire des plateaux (40mm x 40mm).



Figure 19:Montage de l'essai de compression (Laboratoire GICA Sour El Ghozlane)..

V. La Densité apparente des composites bois-ciment

La densité apparente des composites bois-ciment d'Eucalyptus a été déterminée par le rapport de la masse du 40 x 40 x 160 mm au volume apparent après la cure de 28 jours (20°C, RH = 98%) et le séchage à l'étuve à 103 ± 2°C, jusqu'à masse constante. Ensuite, les échantillons ont été refroidis dans un dessiccateur et pesés sur une balance analytique avec une sensibilité de ± 0,01 g. La masse de chaque échantillon a été déterminée en calculant la moyenne arithmétique de trois essais. Les dimensions des spécimens ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse numérique avec une sensibilité de ± 0,001 mm. La densité (D) a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$D = \frac{M_0}{V_0}$$

Où M_0 est le poids sec (g) et V_0 est le volume sec (cm³) de l'échantillon.

VI. Essai d'absorption par capillarité

Le but de cette expérience est de déterminer la capacité d'absorption d'eau du matériau composite ciment - bois d'eucalyptus. Cette expérience est réalisée conformément à la norme EN 480-5. Des éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16cm préalablement séchées à l'étuve jusqu'à un poids constant. Le principe consiste à poser la section transversale de l'éprouvette en contact avec l'eau sur une durée de 90 minutes dans un récipient où la profondeur d'immersion a été maintenue constante durant l'expérience.

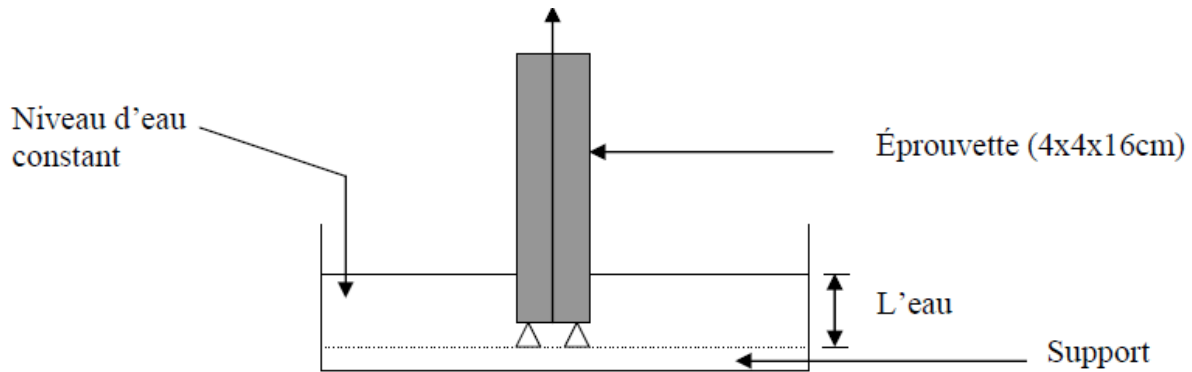


Figure 20: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption par capillarité (Merabti ,2005)

VII. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'essai d'absorption d'eau par immersion a été effectué sur des éprouvettes 4x4x16 cm préalablement séchées à l'étuve jusqu'à la stabilisation du poids, ensuite les immerger dans l'eau pendant 24 heures. Cette expérience a été réalisée sur trois échantillons, la moyenne arithmétique de trois résultats caractérise la valeur du coefficient d'absorption d'eau par immersion. Pour chaque échantillon du matériau composite, on calcule le coefficient d'absorption d'eau par la formule suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100$$

Avec :

A: absorption (%)

Ms : masse de l'éprouvette sèche (g)

Ma : masse de l'éprouvette après saturation (g).

VIII. Essai thermique sur le matériau composite

Pour réaliser cette expérience nous avons utilisé le CT-METRE qui permet de mesurer le coefficient de la conductivité thermique λ du matériau composite ciment-bois d'eucalyptus. L'essai est effectué sur des éprouvettes de dimensions 8x4x16cm,

conservées dans une étuve pendant 24 heures à une température de 103°C. La détermination de la conductivité thermique λ se fait entre deux échantillons. Le nombre d'éprouvettes confectionnées pour chaque composition est de quatre, et la moyenne des résultats trouvés est la valeur retenue de l'essai.



Figure 21: Appareil CT-METRE de mesure de la conductivité thermique (CNERIB Souidania)

IX. Vitesse de propagation des ondes ultrasonores

Le module d'élasticité dynamique des composites a été estimé de façon indirecte par une mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, conformément à la norme NF EN 12504-4. Le principe vise à déterminer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers le matériau élaboré. Les ultrasons sont des vibrations qui se propagent sous forme d'ondes, produisant un champ sinusoïdal de contraintes mécaniques. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore est mesurée entre deux capteurs piézoélectriques (un émetteur et un récepteur), mis en contact avec l'échantillon à chaque extrémité. Cette vitesse peut être reliée au module élastique dynamique (E_{dyn}) du matériau à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{dyn} = \rho_d \cdot V_p^2 \cdot \frac{(1 - \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Avec ρ_d la masse volumique sèche du matériau (kg.m^3)

V_p : la vitesse de propagation (m/s).

ν : le module de Poisson, couramment pris entre 0,2 et 0,3

Chapitre III: Caractérisation des matières premières

Chapitre III : Caractérisation des matières premières

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières utilisées dans notre recherche. Il est indispensable de connaître la composition chimique du ciment et les caractéristiques physico-chimiques du bois pour élucider les mécanismes d'interaction.

I. Le ciment:

I.1. Analyse par spectrométrie de fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence X est la technique utilisée pour déterminer la composition en oxydes du lot de ciment. Les teneurs sont présentées dans le tableau 7. Les résultats obtenus, sont à comparer avec ceux fournis par le cimentier (voir chapitre II).

Tableau 7:Composition élémentaire du ciment CEM 1 déterminée par fluorescence X (comparaison avec les valeurs du cimentier).

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO _L	K ₂ O	Na ₂ O
Résultats obtenus %	21.32	4.54	4.06	63.49	2.71	1.98	1.67	0.65	0.12
Valeurs du cimentier %	21.27	4.54	4.06	63.42	2.68	1.98	1.64	0.59	0.10

On constate qu'il y a une légère différence avec les résultats de la cimenterie, observée sur les oxydes SiO₂ , CaO , MgO , CaOL , K₂O , Na₂O . A partir de la teneur des oxydes, il est possible de déterminer la composition minéralogique du ciment qui est basée principalement sur les équations de Bogue. Ce dernier a développé une formule qui permet de calculer la composition en minéraux principaux C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF (composition minéralogique) d'un clinker ou d'un ciment à partir de sa composition chimique. En se basant sur certaines hypothèses :

- Toutes les réactions chimiques dans le four sont complétées.
- Tout le fer se combine avec l'alumine pour former le C₄AF.
- Toute l'alumine se combine avec la chaux et avec le fer pour former le C₃A et le C₄AF.

- Toute la chaux se combine avec le fer, l'alumine et la silice pour former le C4AF, le C3A, le C2S et le C3S.
- La chaux combinée est la différence entre la chaux totale et la chaux libre. La substitution élémentaire dans les phases cristallines est négligée.
- Tout le SO₃ provient du gypse. (Le Borgne. 2010).

$$C3S = 4.071 C - 7.602 S - 6.719 A - 1.430 F - 2,85 (SO_3).$$

$$C2S = 8.602 S + 5.068 A + 1.079 F - 3.070 C$$

$$C3A = 2.650 A - 1.692 F$$

$$C4AF = 3.043 F$$

Tableau 8: Composition des phases potentielles par la formule de Bogue (Taylor .1990) .

	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur en ciment (%)	53.52	20.63	5.16	12.35
FRX	53.32	23.39	5.16	12.35

I.2. Analyse de granulométrie :

La distribution granulométrique des particules de ciment Portland ont une grande influence sur la cinétique d'hydratation, le développement de la microstructure et les propriétés des matériaux à base de ciment (Bentz. 2008). L'influence de la granulométrie sur la résistance du ciment montre que la résistance à la compression augmente avec la finesse, et les ciments présentant une distribution granulométrique étroite ont une résistance supérieure à celles présentant une distribution granulométrique étendue.

La granulométrie laser est la technique utilisée pour mesurer la taille des particules de ciment. Cette méthode est basée sur la théorie de Fraunhofer, qui décrit la partie de la déviation de la lumière qui résulte de la diffraction. Le granulomètre utilisé est un Mastersizer 2000 qui mesure des tailles comprises entre 0.2 et 2000 µm. Selon Fraunhofer, l'angle de diffraction est en fonction de la taille des particules. Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand. Pour les particules inférieures à 10 µm, la théorie de Mie doit être appliquée.

Des vagues successives d'ultrasons sont appliqués pendant des périodes de plus en plus

longues et des puissances croissantes afin de vérifier la présence d'éventuels agglomérats. Lorsque l'échantillon est soumis à des vagues d'ultrasons allant de 25% jusqu' à 30 %. On remarque que le pourcentage volumique des grosses particules diminue légèrement et se répartit sur l'ensemble des plus petites particules. Les ultrasons appariés casser les plus gros agrégats présents dans le ciment anhydre. Le diamètre médian des particules est égal à $8.50 \pm 0.16 \mu\text{m}$.

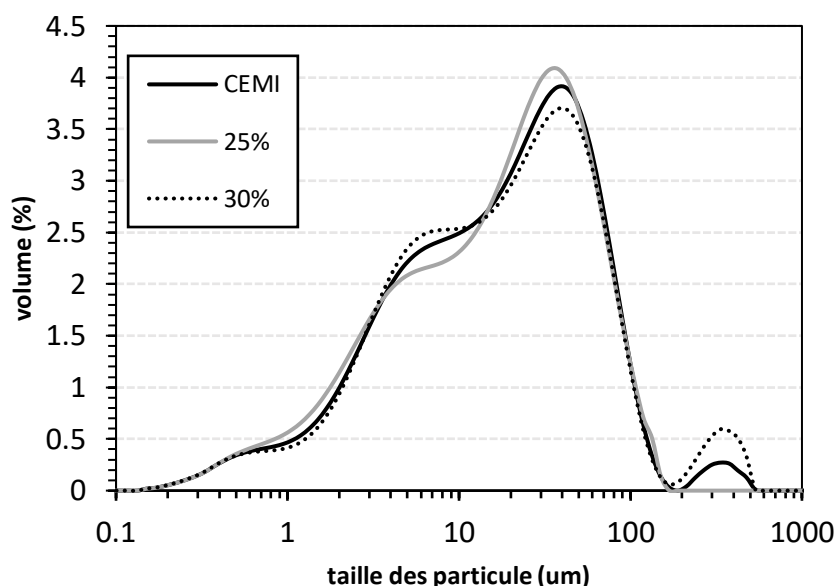


Figure 22:Détermination de la taille des particules par granulométrie laser

II. Bois d'Eucalyptus Camaldulensis Dehn

La matière végétale choisie pour cette étude est le bois d'eucalyptus *Camaldulensis Dehn*. Ce type de bois est largement disponible en Algérie. C'est un arbre à croissance rapide et son bois peut être utilisé dans plusieurs domaines (bois de feu, piquets, poteaux, outils et pâte à papier...). Ce bois provenant d'Australie, a été introduit en Algérie en 1857 pour assainir les terrains marécageux. Les plantations se situent dans les régions Est (EL-Kala, Annaba, Skikda) ; au centre (Tizi- Ouzou et Bainem) et à l'Ouest (Mostaganem). En 2020, une superficie forestière de 880 ha a été consacrée pour la production de bois d'eucalyptus, cette opération, s'inscrivant dans le cadre de l'extension de la production forestière et l'exploitation du bois (Source DGF).

A partir de la trituration du bois d'eucalyptus par broyage, on obtient une poudre de bois de granulométrie bien définie, qui servira à nos essais sous trois formes : le bois à l'état naturel, bois

traité à l'eau bouillante et le bois traité chimiquement par NaOH. Les procédés de traitement utilisés sont présentés au chapitre II. Page 44

II.1. Caractérisation du bois d'eucalyptus :

Dans cette partie nous allons décrire les différentes caractérisations ainsi que les techniques et les méthodes suivies :

- Caractérisation chimique : détermination des principaux constituants de la poudre de bois d'eucalyptus
- Caractérisation physique : granulométrie, densité (annexe C), taux d'absorption d'eau (annexe D).
- Caractérisations structurales : infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF),

II.1.1. Caractérisations chimiques

II.1.1.1. Teneur en eau et matières volatiles

La teneur en eau et en matière volatiles correspond à la perte de masse subie par l'échantillon après séchage dans une étuve à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à la stabilisation de la masse pendant 3 heures. Selon la norme française NFV03903, la teneur en eau et en matières volatiles (notée H) est exprimée par :

$$H = [(m_1 - m_2) / (m_1 - m_0)] \times 100$$

m_0 (g) : tare du creuset ,

m_1 (g) : masse du creuset et de la prise d'essai avant chauffage,

m_2 (g) : masse (creuset+résidu) après chauffage jusqu'à poids constant.

A partir de l'expression de la teneur en eau, la teneur en matières sèche est exprimée par :

$$M_s = 100 - H = (m_2 - m_0) / (m_1 - m_0) \times 100$$

D'après les résultats de la caractérisation chimique, le pourcentage en matière sèche est de 86%.

II.1.1.2. Détermination des taux des constituants extractibles

Afin de déterminer la composition chimique de la poudre de bois d'eucalyptus une chaîne d'extractions par soxhlet ont permis d'isoler les différents composants contenus dans le matériau tels que : pectines, graisses et cires, hémicelluloses et lignines.

- **Extraction au Soxhlet**

Cette technique permet de faire l'extraction par solvant continue d'une espèce chimique contenue dans une poudre solide. L'extracteur (Soxhlet), contient une cartouche remplie de résine ou d'un filtre solide fixé sur un ballon contenant le solvant d'extraction.

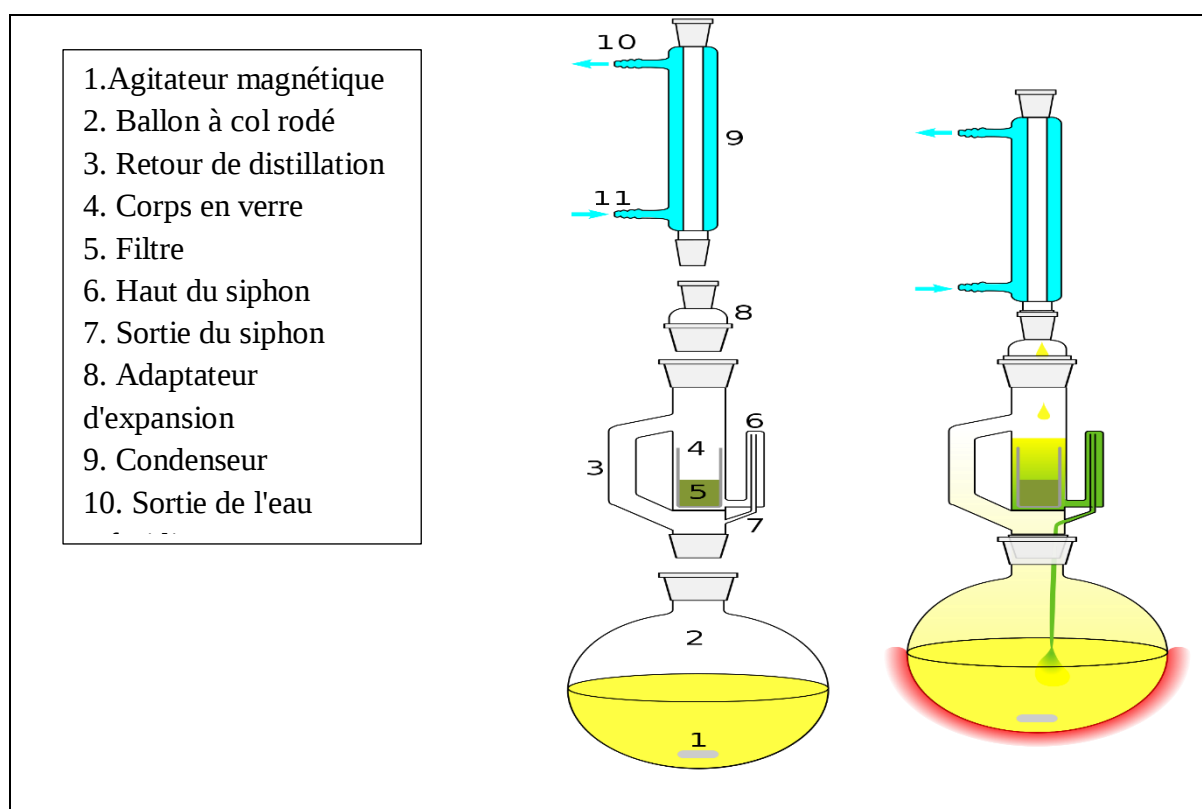


Figure 23: Schéma d'un extracteur de Soxhlet

Le principe consiste à chauffer le solvant extraction, les vapeurs passent par le tube puis condensent dans le réfrigérant, Le solvant condensé s'accumule dans l'extracteur jusqu'à atteindre le sommet du siphon, et provoque le retour du liquide dans le ballon (Figure23),

accompagné des substances extraites. A la fin de l'extraction, l'essentiel des molécules à analyser est transféré dans l'extrait.

Les étapes d'extraction de la poudre de bois d'eucalyptus sont les suivantes :

- Éliminer les graisses et les cires ,15 g de poudre de bois d'eucalyptus sont extraites par 400mL d'éthanol à 80% durant 2 heures.
- Éliminer les sucres libres par de l'eau à 100°C pendant 2 heures.
- Séchage pendant 12 heures à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ pour déterminer la masse d'extractibles.
- Élimination des pectines par de l'eau à 100°C pendant 10 min, puis par une solution aqueuse d'oxalate d'ammonium à 1% en masse durant 2h.
- Dégrader la lignine dans un mélange de chlorite de sodium et d'acide acétique glacial durant 1 h.
- Éliminer les hémicelluloses par une solution de potasse à 25% pondant 4h.

Après extraction à la soude, le résidu cellulosique est estimé comme suit :

$\% \text{ cellulose} = 100\% - X\% \text{ (cires+graisses+pectines+lignines+hémicelluloses).}$ (Barbat.A.. 2009)

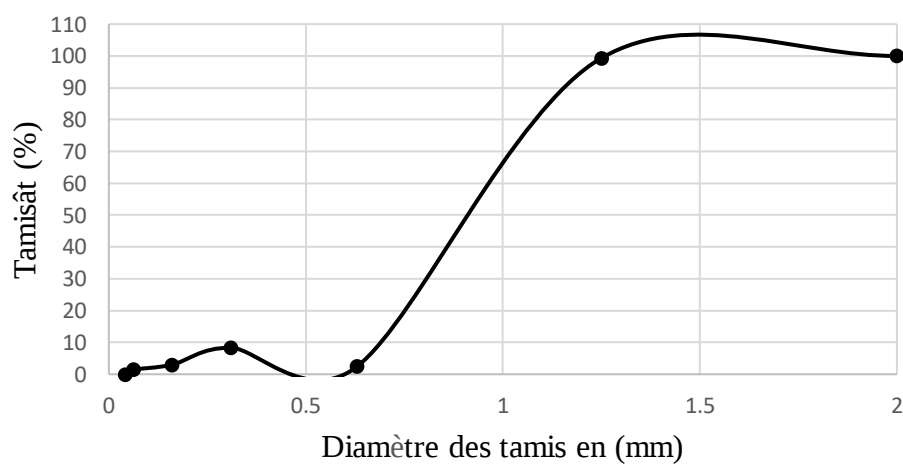
II.1.2. Caractérisation physique

II.1.2.1. La granulométrie.

Dans toutes les expériences le bois d'eucalyptus est utilisé sous forme de poudre. L'analyse granulométrique par tamisage est la méthode suivie pour déterminer et observer les différents diamètres des particules de bois. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 9:

Tableau 9: Les résultats de l'analyse granulométrique des particules de bois d'eucalyptus.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
2	0	0	100
1.25	6	0.66	99.34
0.63	716	97.55	2.45
0.31	825	91.66	8.34
0.16	873	97	3
0.063	877	98.55	1.45
Fond	897	100	0

**Figure 24:** Courbe granulométrique des particules de bois d'eucalyptus.

- **Module de finesse**

Suivant la Norme NFP18-540, module de finesse : C'est le centième de la somme des refus cumulés (exprimé en pourcentage de poids) aux différents diamètres des tamis. Le module de

finesse est une caractéristique importante qui influence l'hydratation du composite.

$$M.F = \frac{(\text{Somme des refus au tamis } 0.06, 0.16, 0.31, 0.63, 1.25, 2)}{100}$$

$$M.F = \frac{(98.55 + 97 + 91.66 + 97.55 + 0.66)}{100} = 3.85$$

Afin d'éviter l'influence de la taille des particules sur la réactivité entre le bois et le ciment, la poudre de bois à l'état naturel et traitée, sont tamisées à une granulométrie $\geq 400 \mu\text{m}$.

II.1.3. Caractérisation structurale

II.1.3.1. Analyse par spectrométrie infrarouge

La spectrométrie infrarouge est une des techniques les plus utilisées pour l'identification des molécules organiques et inorganiques à partir de leurs propriétés vibrationnelles. Cette technique a été utilisée pour analyser l'influence des traitements tels que l'acétylation, retification...sur la composition chimique de bois.

Le principe de la spectroscopie infrarouge (IR) repose sur l'absorption de la lumière par la plupart des molécules dans la région de l'infrarouge et en convertissant cette absorption en vibration moléculaire (déformation, élongation) qui correspond spécifiquement aux liaisons présentes dans la molécule. L'analyse entre rayonnement incident et transmis à travers l'échantillon permet de déterminer les principales fonctions chimiques présentes dans l'échantillon.

L'analyse du bois à l'état naturel et des bois traités à l'eau bouillante et par NaOH, est réalisée sur un spectromètre à transformée de Fourier assisté par un micro ordinateur. Les résultats obtenus par spectroscopie infrarouge sont présentés dans les figures 25.

On observe une large bande centrée sur 3335cm^{-1} , correspondant aux vibrations des groupes O-H. Les deux types de traitement on réduit l'intensité du signal. La bande à 2926 cm^{-1} est attribuée aux étirements asymétriques de liaison C-H. La bande 1720 cm^{-1} traduit l'existence des groupements carbonyle (C=O) caractéristiques des hémicelluloses. La bande à 1560 cm^{-1} correspond à des groupes C=C conjuguées des systèmes aromatiques caractéristiques de lignine. La bande 1411cm^{-1} montre l'existence des pectines, de lignine et de l'Hémicellulose.

D'après la figure 25, le traitement à l'eau bouillante et le traitement alcalin ont modifié l'intensité du signal (IR).

L'intensité de signal de bois traité à l'eau bouillante est presque similaire au signal de bois naturel. On remarque une diminution de l'intensité de la bande caractéristique de groupement O-H. Comme les trois principaux polymères présents dans le bois possèdent des groupements OH, donc on ne peut pas attribuer cette diminution à la dégradation d'un des constituant de bois.

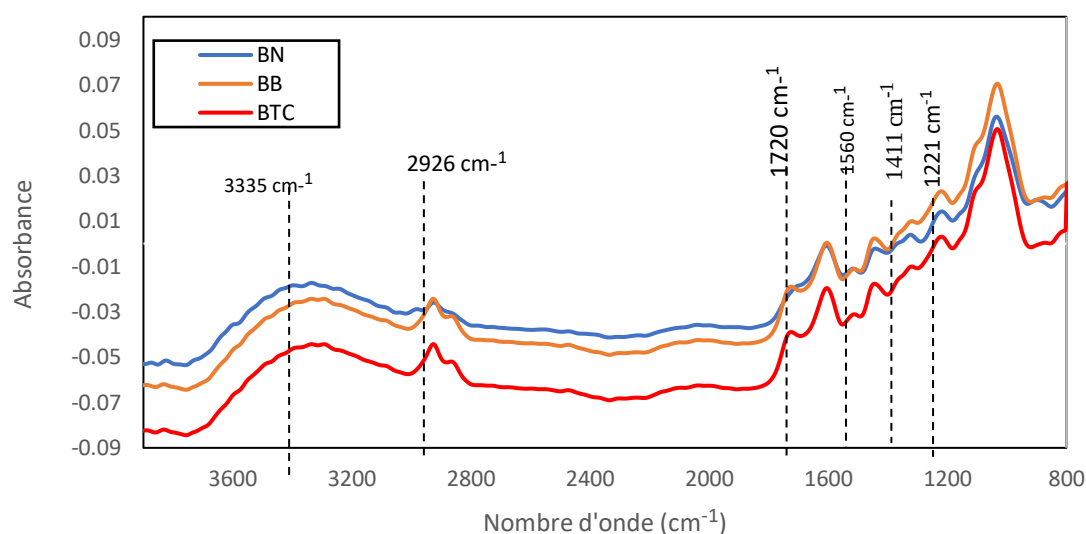


Figure 25: Spectres infrarouges de 4000cm-1 à 800cm-1 du bois d'eucalyptus naturel, traité à l'eau bouillante, traité par NaOH

Le principal effet de traitement alcalin sur la poudre de bois d'eucalyptus est la diminution de l'intensité du signal des groupements carbonyles C=O caractéristique des hémicelluloses, ce qui a été expliqué par une hydrolyse partielle des hémicelluloses en milieu alcalin et qui engendre la rupture des liaisons C–O–C entre deux monomères, la solution devient riche en oligosaccharides de poids moléculaires inférieurs et libérerait des sucres simples sous leur forme acide. Le traitement alcalin nettoie la surface des fibres en dégradant leurs constituants amorphes tels que les graisses, les cires ainsi que les polysaccharides (lignines, hémicelluloses) (Sedan 2007). Ces résultats sont similaires avec celle de D. Sedan (Sedan, 2007) en utilisant les fibres de chanvre.

Chapitre IV : Influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur l'hydratation de ciment

Chapitre IV : Influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur l'hydratation de ciment

Il est reconnu dans le domaine des composites à renfort lignocellulosique, l'extrême nocivité des extractibles aqueux de bois sur le processus d'hydratation du ciment. Ce chapitre est consacré à l'étude de l'hydratation du ciment en milieu concentré et dilué en présence de la poudre de bois d'eucalyptus *camaldulensis Dehn* naturel et traité thermiquement à l'eau bouillante ainsi que du bois traité chimiquement par NaOH.

Pour toute l'étude les composites contenant du bois naturel, traité thermiquement et bois traité par NaOH seront nommés respectivement BN, BB, BTC.

I. Effet de bois sur le temps Caractéristique d'hydratation du ciment

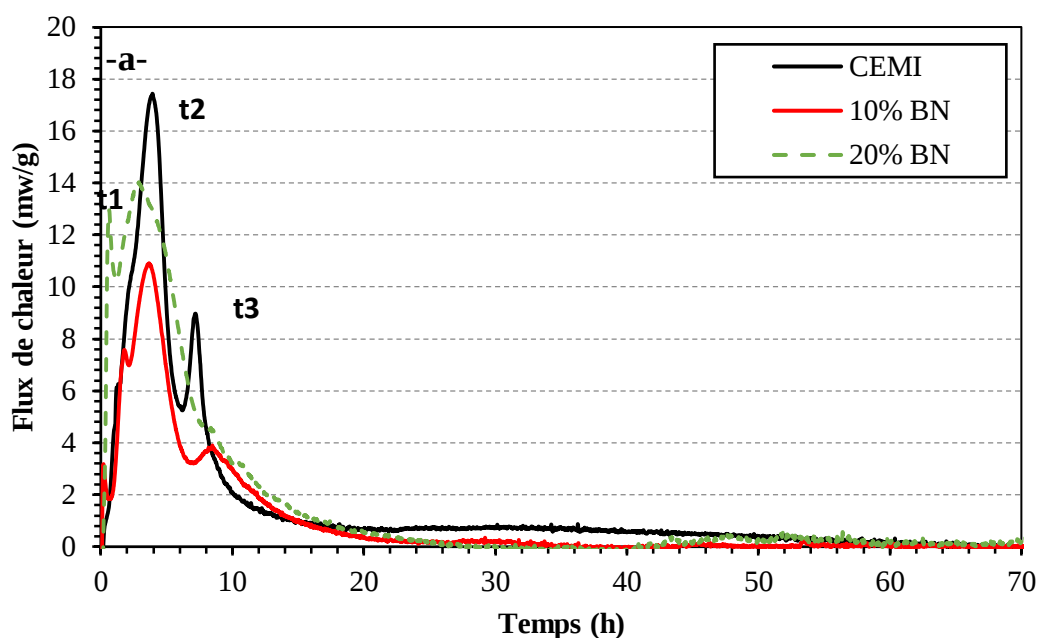
I.1. Suivi d'hydratation par calorimétrie isotherme:

Plusieurs auteurs ont utilisé la calorimétrie pour étudier l'influence du bois ou les adjuvants sur la cinétique d'hydratation du ciment. Na et al ,(2014) ont montré que le pouvoir retardateur de la matière lignocellulosique est lié à la dissolution des extractifs présents à la surface des fibres ce qui altère l'hydratation du ciment, et provoque des retards considérables dans le temps de solidification du ciment. Ainsi, Jongvisuttisun,(2018) a montré que l'ajout des pulpes d'eucalyptus comme agents de durcissement interne peut légèrement retarder la prise du ciment.

Le suivi d'hydratation par calorimétrie isotherme assure un suivi continu de la cinétique d'hydratation et d'établir le pouvoir retardateur du bois en milieu concentrer ($E/C=0.4$). La caractérisation du processus d'hydratation est basé sur la méthode Sauvat et al.(1999) qui définit 3 temps caractéristiques de l'hydratation du ciment : t_1 correspond à la fin de la période d'induction, t_2 et t_3 représentent les temps respectifs des 2ème et 3ème pics. L'attribution de ces 2 pics est encore controversée. Pour ((Bensted ,1987), le premier de ces pics est attribuable à l'hydratation du C3S formant les CSH et la portlandite. Le second pic correspond à l'hydratation de C3A qui conduit à la formation des aluminates de calcium hydratés (C-A-H). Alors que (Sauvat,1999) a suggéré une attribution inverse de ces pics d'hydratation. L'évolution de la chaleur dégagée est calculée par cumul des flux de chaleur, elle est représentative du degré d'avancement de l'hydratation

I.1.1. Influence de la teneur en bois d'eucalyptus sur l'hydratation du ciment

Afin d'évaluer l'effet du dosage en bois naturel sur l'hydratation du ciment, nous avons effectué des mesures calorimétriques avec des concentrations massiques de 10% et 20% (rapport B/C = 0%, 10%, 20% et E/C=0.4). On remarque que le flux de chaleur est affecté par la présence de bois d'eucalyptus (figure 26.a). La substitution du ciment par du bois naturel conduit à la réduction du maximum de flux de chaleur dégagée mais également à une légère accélération de ce dernier. L'accroissement de la période d'induction (temps t_1) en fonction de la concentration en poudre de bois est linéaire comme démontré par (Ramachandran et al 1992). L'existence d'une relation linéaire entre la durée de la période d'induction et la concentration de la plupart des retardateurs.



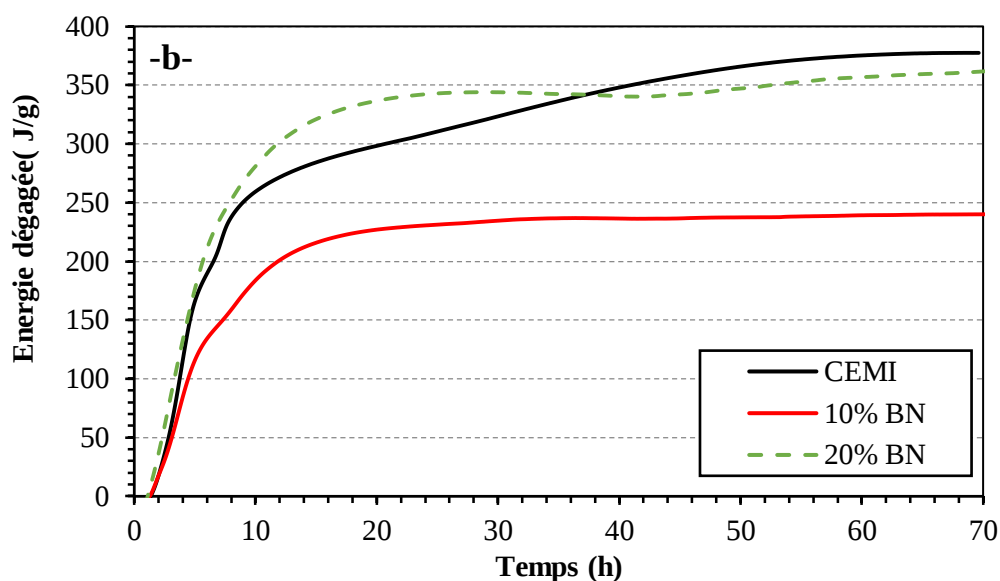


Figure 26: Évolution du flux de chaleur (a) et de l'énergie dégagée (b) au cours du temps en fonction du dosage en bois naturel.

Le pic exothermique maximal (t_2) du coulis de ciment est atteint vers 236 min (soit environ 3.9 h) et correspond à l'hydratation des phases aluminates et silicates, suivi par la période de décélération qui s'accompagne par une diminution de flux de chaleur due à la couche d'hydrates formés autour des grains anhydres empêchant la diffusion de l'eau. En effet, le bois introduit a réduit le temps (t_2) qui a atteint 218 min pour 10% (BN), et 161 min pour 20% (BN). Cela pourrait être dû aux sucres du bois qui catalysent la réaction entre le gypse et les aluminates (De La Grée, G. D. et al, 2017). Le même phénomène a été observé par Delannoy (Delannoy, G. et al. 2020) avec du bois de chanvre. Le troisième pic (t_3) correspond à la déplétion des sulfates, la présence du bois entraîne un abaissement de l'intensité du pic et un retard de son apparition. Le phénomène s'amplifie avec le dosage en bois.

La chaleur cumulée en cours d'hydratation, indique le degré d'hydratation du mélange bois-ciment. La figure (26.b) présente l'influence du bois sur l'évolution de l'énergie dégagée lors de l'hydratation du ciment. Celle-ci a été calculée par intégration du flux de chaleur. En général, l'énergie libérée lors de l'hydratation du ciment est proportionnelle au degré d'hydratation. Pour le ciment de référence, l'énergie dégagée après 72 h d'hydratation est de 377 J/g. Cette dernière est réduite en présence de poudre de bois.

I.1.2. Influence de traitement à l'eau bouillante sur l'hydratation du ciment :

Afin de déterminer l'influence de traitement à l'eau bouillante sur l'hydratation, les conditions opératoires sont conservées, le rapport massique B/C est fixé à 10% et 20% avec un rapport E/C = 0.4.

On constate sur la figure (27a ,27c), que le bois traité par l'eau bouillante modifie la valeur des temps t_1 , t_2 et t_3 par rapport au bois naturel. Une légère augmentation du temps t_2 qui correspond au maximum du flux de chaleur issu de l'hydratation des phases silicates et aluminates. Il est respectivement égal à 3 et 4 heures pour les formulations à base de bois naturel et 20 % du bois traité à l'eau bouillante, à la même teneur en bois, le temps t_2 est continuellement décroissant et ne présente pas de maximum déterminable.

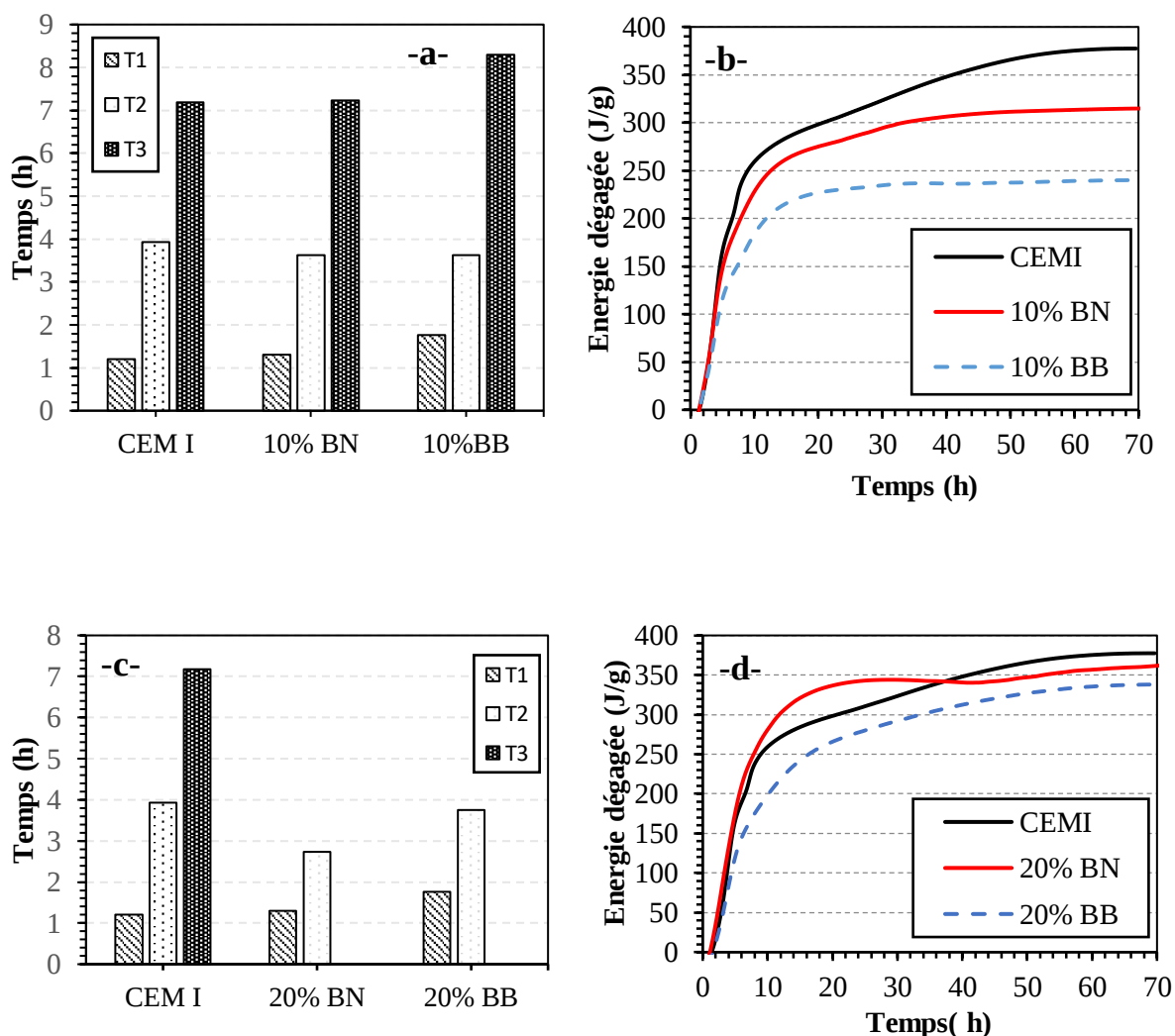
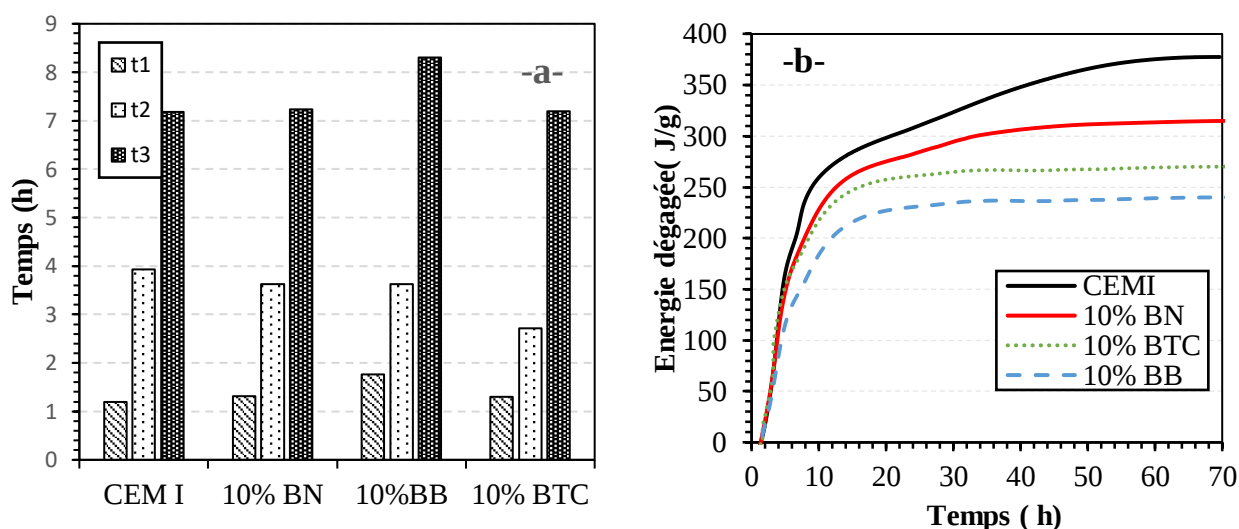


Figure 27: a,c) Influence du bois traité par l'eau bouillante sur les temps caractéristiques de l'hydratation, b, d) Quantité d'énergie dégagée.

La figure (27b,27d) représente le cumul de la quantité de chaleur dégagée au cours de l'hydratation. Durant les premières heures d'hydratation (jusqu'à 2h) aucune différence n'est observable entre les composites. A partir de ce délai la quantité de chaleur cumulée diminue. Le traitement à l'eau bouillante ne semble pas apporter d'amélioration par rapport au bois naturel. Cela peut être attribué au degré d'incompatibilité entre le bois d'eucalyptus et le ciment comme démontré par Wisky et al (Silva et al,2020) en étudiant du bois d'eucalyptus traité thermiquement.

I.1.3. Influence de traitement chimique sur l'hydratation du ciment :

Afin d'évaluer l'impact du traitement chimique du bois par NaOH sur la cinétique d'hydratation, les conditions opératoires précédentes sont conservées.



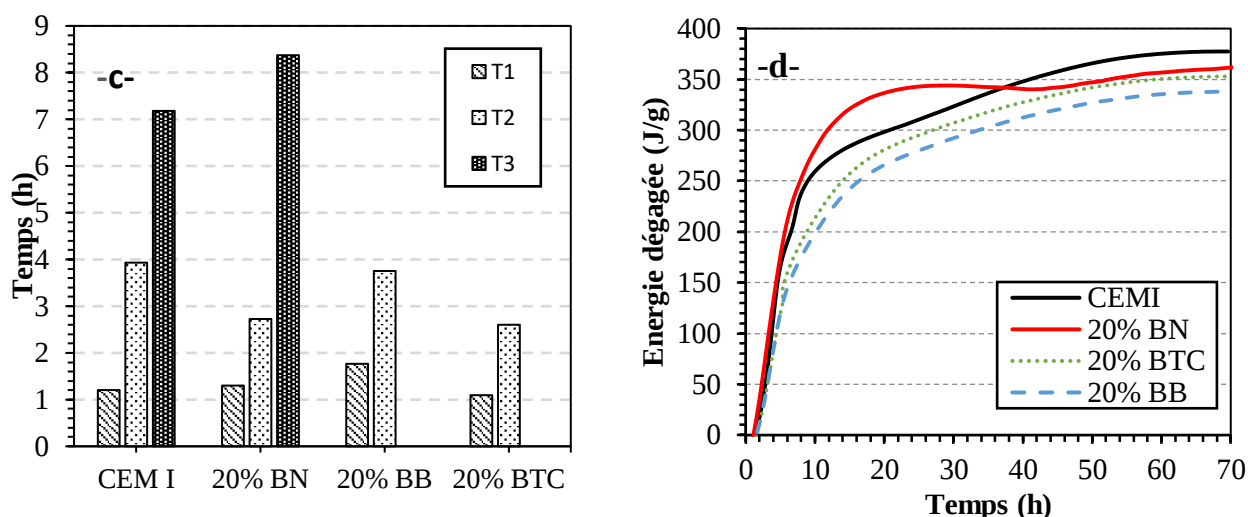


Figure 28:a,c) Influence du bois traité par NaOH sur les temps caractéristiques de l'hydratation, b, d) Quantité d'énergie dégagée.

Le bois traité par NaOH change légèrement la valeur des temps t_1 et t_2 par rapport au bois naturel et accélère l'hydratation par rapport au bois traité par l'eau bouillante (figure 28 a, c). A partir de temps t_2 le flux de chaleur est décroissant et ne présente pas de maximum déterminable pour les deux types de traitement.

Le traitement alcalin a accéléré l'hydratation des silicates et aluminates (t_2) par rapport au bois naturel et au bois traité à l'eau bouillante, ce qui explique la dégradation des constituants amorphes présente à la surface des fibres de bois qui jouent le rôle dans l'incompatibilité bois-ciment.

I.2. Suivi de l'hydratation du ciment par conductimétrie

La mesure conductimétrique est une méthode classique pour étudier l'effet des adjuvants sur la cinétique d'hydratation. Cette méthode a été utilisée en présence de poudre de bois d'eucalyptus. Les expériences ont été réalisées en suspension diluée avec un rapport massique eau/ciment (E/C) constant, égal à 20.

I.2.1. Influence de la teneur en bois d'eucalyptus sur l'hydratation du ciment :

L'influence de l'incorporation du bois a été examinée pour des dosages massiques en bois compris entre 5 et 30% avec une augmentation de 5% entre chaque expérience.

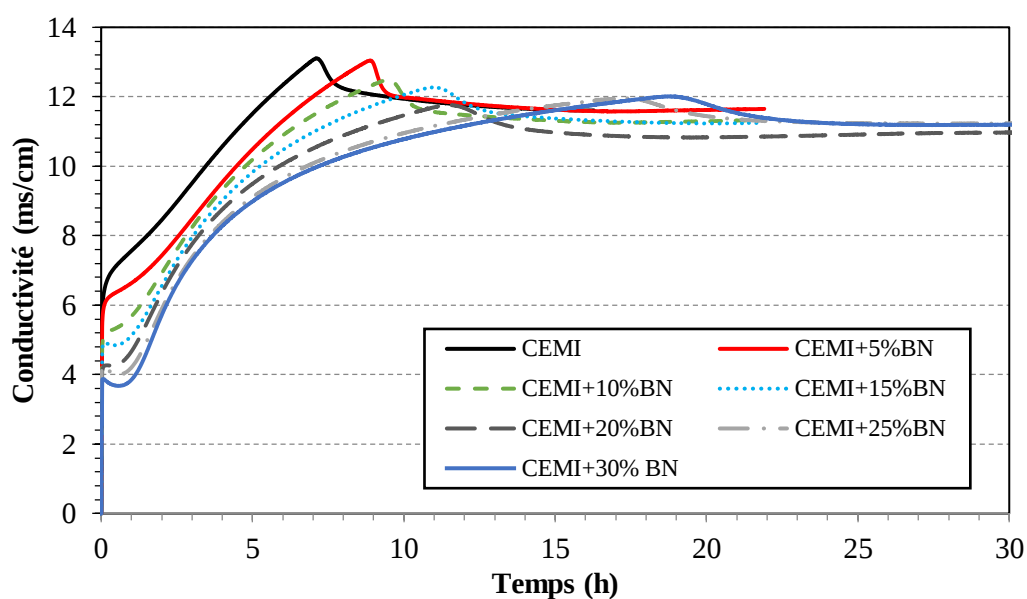


Figure 29: Effet de la concentration en bois naturel sur le temps correspondant au maximum de la courbe conductimétrique

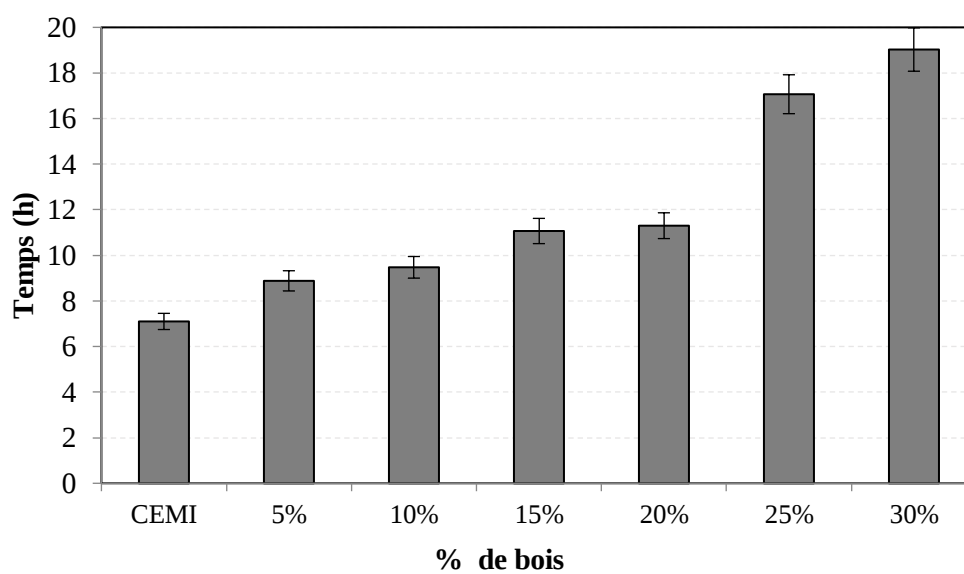


Figure 30: Effet de la concentration en bois naturel sur l'hydratation du ciment en conductimétrie

On observe sur la figure 29 que la teneur en bois est un paramètre qui influe sur l'allure de la courbe conductimétrique d'une suspension du ciment. D'après les courbes conductimétriques, différentes étapes peuvent être caractérisées :

Le contact des grains de ciment avec l'eau provoque une augmentation de la conductivité. Cette augmentation est caractéristique de dissolution des phases anhydres du ciment, libérant des ions silicates, hydroxyde, aluminat dans la solution. La figure 29 montre que la conductivité diminue lorsque l'on introduit la poudre de bois. La valeur de cette conductivité se trouve être inversement proportionnelle à la teneur en bois introduite. La présence de bois dans la suspension de ciment a réduit la dissolution des grains anhydres.

Dans un 2^{ème} temps, la germination des C-S-H entraîne un infléchissement de la courbe. Ensuite, la conductivité augmente progressivement car les ions consommés (Ca^{2+} , OH^- et $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$) par la précipitation des CSH (germination et croissance) ne compense pas ceux libérés par la dissolution des phases anhydres. Lorsque le degré de sursaturation par rapport à la portlandite atteint une valeur limite, celle-ci précipite et la conductivité chute brutalement. Les résultats (figure 30) montrent que la précipitation de la portlandite est fortement retardée par la présence du bois. Ce retard est proportionnel à la teneur en bois introduite. La présence de la poudre (BN) semble agir dès l'étape de dissolution car elle conduit à une diminution de la conductivité initiale. Ce résultat pourrait provenir du phénomène de complexation entre les ions Ca^{2+} et les extractibles du bois.

Après la dissolution, le palier sur la courbe indique un ralentissement du processus d'hydratation et la limitation de la germination des hydrates. Des résultats similaires ont été obtenus par Boix et al (Boix, E., et al,2020). En travaillant sur l'interaction entre du ciment et du miscanthus. La longueur du palier dépend du nombre de C-S-H présents dans la suspension.

1.2.2. Influence de traitement à l'eau bouillante sur l'hydratation du ciment

Le suivi de l'hydratation du ciment en présence de bois traité à l'eau bouillante est présenté sur la figure 31, Le rapport massique bois/ciment (B/C) étudié est compris dans l'intervalle 5 et 30% pour que la figure soit claire, cinq courbes sont présentées.

On observe sur la courbe conductimétrique que la croissance des hydrates limite par diffusion (pente 2) sont affectés par l'utilisation du bois traité à l'eau bouillante (BB), et le temps de précipitation de la portlandite est similaire avec le mélange en (BN) (Figure.32), ce

qui confirme les résultats de l'étude calorimétrique que le traitement à l'eau bouillante n'apporte pas d'amélioration par rapport au bois naturel.

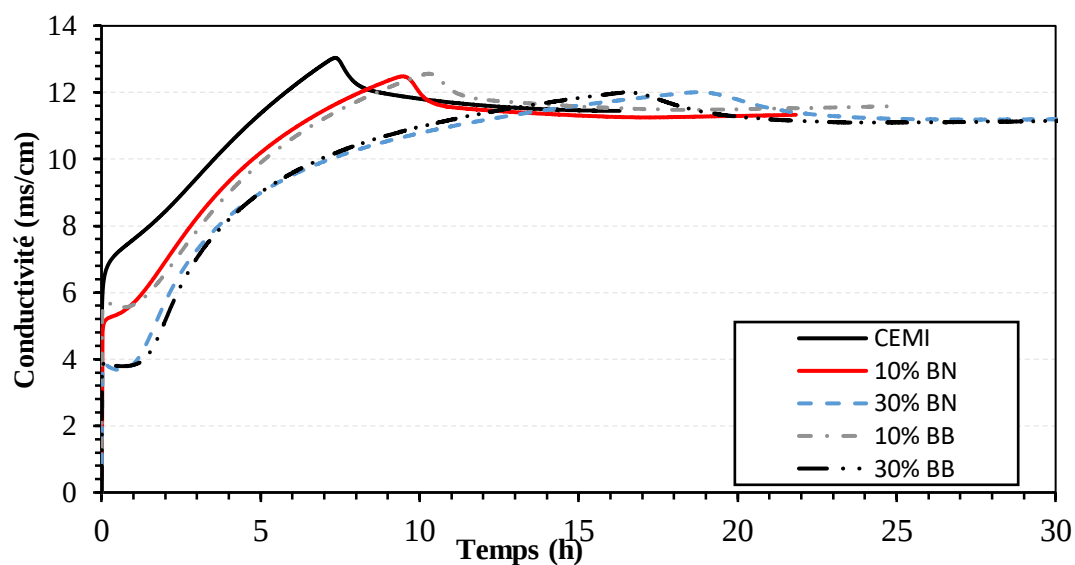


Figure 31: Effet de la concentration en bois naturel et traité à l'eau bouillante sur l'hydratation du ciment en conductimétrie

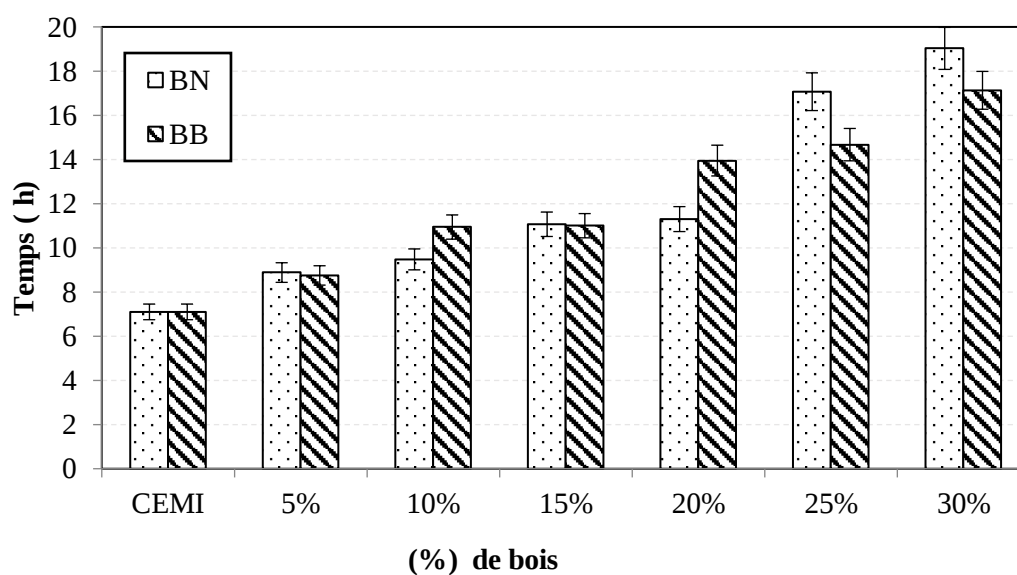


Figure 32: Temps de précipitation de la portlandite à différentes teneurs en bois.

1.2.3. Influence de traitement chimique sur l'hydratation du ciment

Afin de déterminer l'influence du traitement chimique (traitement alcalin) sur le bois et sur la cinétique d'hydratation du ciment, des dosages massiques en bois traité compris entre 5 et 30% ont été mélangés avec le ciment. La figure 33 représente l'effet de traitement chimique sur l'hydratation du ciment en conductimétrie. En le comparant avec le traitement à l'eau bouillante (BB) et le bois naturel (BN), des mélanges en 10% en bois de chaque type sont présentées sur la figure 33, 34.

On observe sur la figure 34 que le traitement alcalin favorise d'avantage la précipitation de la portlandite ce qui indique une accélération d'hydratation des silicates en comparant un échantillon de bois naturel avec celui de bois bouilli. (Boix et al, 2020) dans sa recherche a montré que la précipitation de portlandite commence très tôt lors de l'utilisation de traitement alcalin et certains composants libérés de bois traité par NaOH peuvent favoriser l'hydratation.

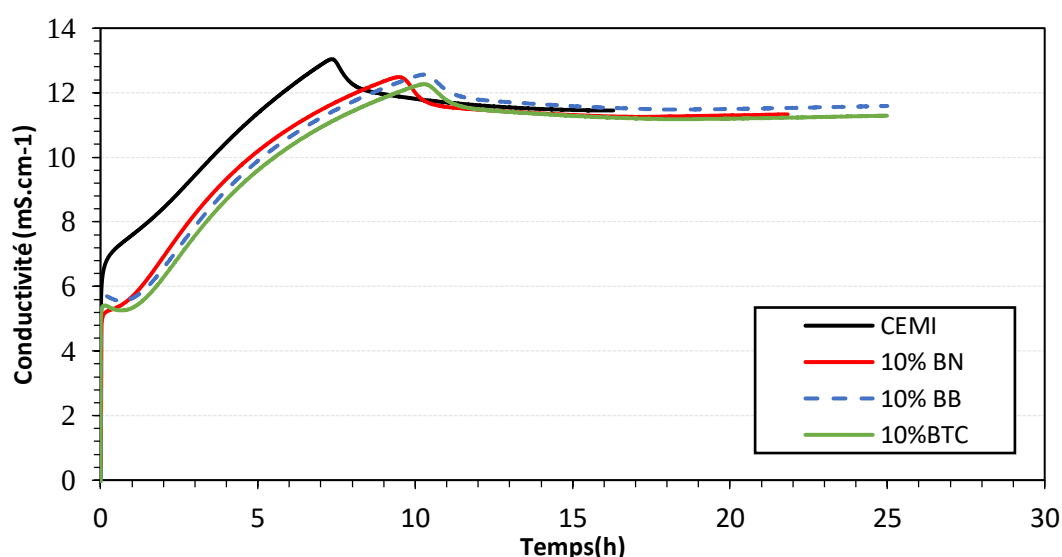


Figure 33: Effet de la concentration en bois naturel, traité à l'eau bouillante et le bois traité par NaOH sur l'hydratation du ciment en conductimétrie

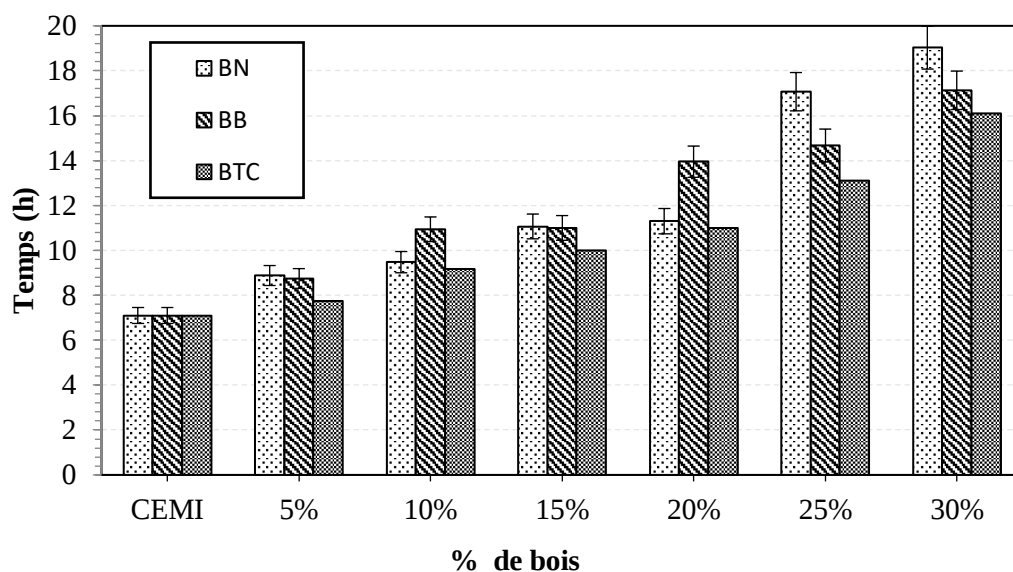


Figure 34: Temps de précipitation de la portlandite à différentes teneurs en bois (BN, BB, BTC)

I.3. Conclusion

En milieu concentré par calorimétrie l'incorporation de la poudre de bois naturel a modifié la vitesse de la dissolution des grains de ciment, déterminé par la variation de la valeur t_1 ; alors que les traitements ont favorisé l'accélération de la période. Le traitement à l'eau bouillie n'a pas amélioré la vitesse d'hydratation par rapport au bois naturel. Le traitement alcalin permet la dégradation des constituants amorphes présents à la surface de bois et responsable sur l'incompatibilité bois -ciment, ce qui a favorisé une accélération d'hydratation des silicates et aluminates (t_2) par rapport au bois naturel et au bois traité à l'eau bouillante.

La conductimétrie montre un retard de précipitation et diminution de la quantité de la portlandite avec les teneurs élevées en bois. Le traitement chimique par NaOH a accéléré l'hydratation des silicates ce qui a favorisé la précipitation par rapport à l'échantillon de bois traité à l'eau bouillante.

II. Influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur les différentes phases cimentaire.

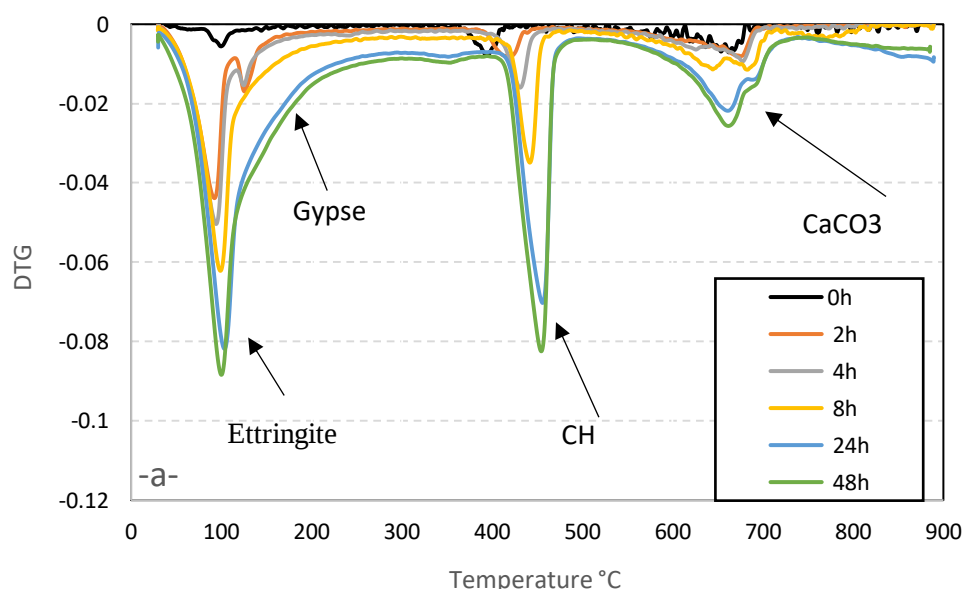
L'analyse expérimentale précédente a permis de comprendre d'une manière globale l'action de la poudre de bois d'eucalyptus sur l'hydratation de ciment. Nous allons, à présent, étudier l'effet de bois sur l'hydratation des différentes phases cimentaires. Nous abordons l'étude par les phases silicates, et l'influence de bois sur la formation de la portlandite et le carbonate de calcium.

II.1. Effet de la poudre de bois d'eucalyptus sur l'hydratation des phases silicatées

II.1.1. Influence sur la portlandite par analyse thermogravimétrie

L'analyse thermogravimétrique (TG/DTG) est une technique qui permet de suivre l'évolution de la masse d'un échantillon en fonction de la température. Une méthode pratique pour déterminer l'effet des adjuvants sur l'hydratation du ciment. Elle permet l'identification et la quantification des différents hydrates.

Après le stoppage d'hydratation et le séchage, il est nécessaire d'éliminer la poudre de bois par tamisage du mélange bois-ciment en utilisant différents diamètres. La matière organique dérivée de la décomposition thermique de la poudre de bois est une source de perturbation de signal TG.



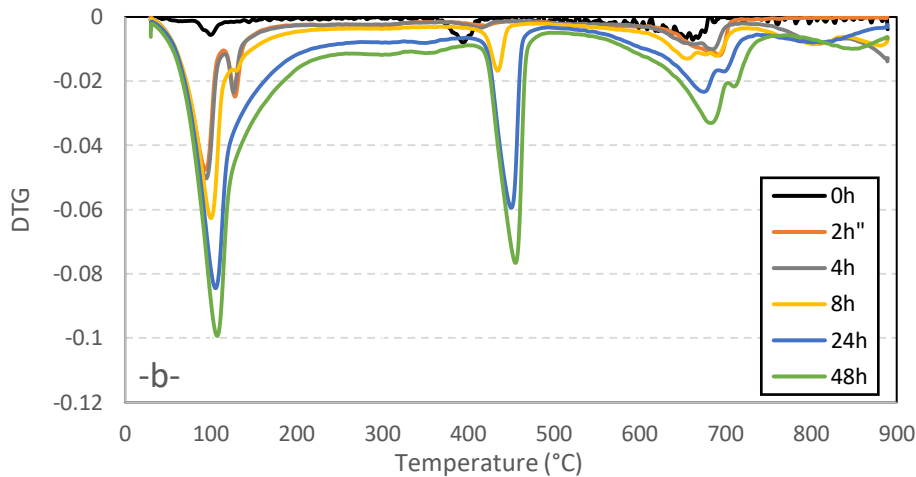


Figure 35: Courbes DTG de (a) ciment pur (CEMI), (b) CEMI +20% BN.

II.1.1.1. Influence du pourcentage de poudre de bois

La quantification de la portlandite a été faite à partir de la courbe TG pour le coulis de ciment et pour le mélange bois-ciment selon l'équation de (Silva .2002) décrit dans le chapitre II .Page.47 qui permet de suivre la cinétique de formation de la portlandite. La figure 36 montre l'évaluation du pourcentage massique de la portlandite. Avec l'échantillon de référence CEMI, on remarque une augmentation de la teneur en portlandite au cours de temps. Néanmoins, la présence de bois inhibe la formation de la portlandite et l'effet d'inhibition augmente avec la concentration massique en poudre de bois d'eucalyptus. Ces résultats ont été confirmés dans les études de suivi d'hydratation de (Bishop, M., & Barron (2006); ayant conclu que les lignosulfonates de sodium inhibent l'hydratation de C3S.

Zhang et al. ont montré que les sucres aliphatiques retardent l'hydratation des silicates tricalcique (C₃S) (Zhang, L. et al, 2010). Ils fonctionnent comme des accélérateurs retardés, inhibant l'hydratation de la période d'induction. Ils ont Indiqué aussi que le saccharide augmente les temps de prise initiale et finale du C₃S et qui dépend de la concentration de saccharide ajoutée.

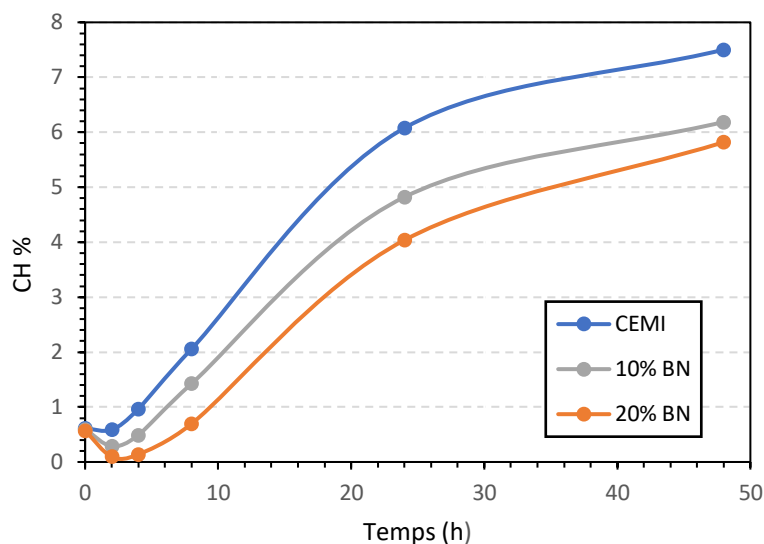


Figure 36: Évaluation de la teneur en portlandite en fonction du temps

II.1.1.2. Influence du traitement à l'eau bouillante

La figure 37 représente l'évolution de la portlandite formée durant 48 h d'hydratation. L'observation graphique montre que la présence de bois naturel et le bois traité à l'eau bouillante inhibent la formation de la portlandite pendant 5 heures, donc on constate qu'après 5 h d'hydratation que la portlandite a commencé à précipiter en présence de bois naturel et de bois traité, Ceci peut être lié à l'hygroscopicité du bois qui absorbe une quantité d'eau de gâchage après 5 h ; l'accélération diffère, le traitement à l'eau bouillie a amélioré le rendement de CH.

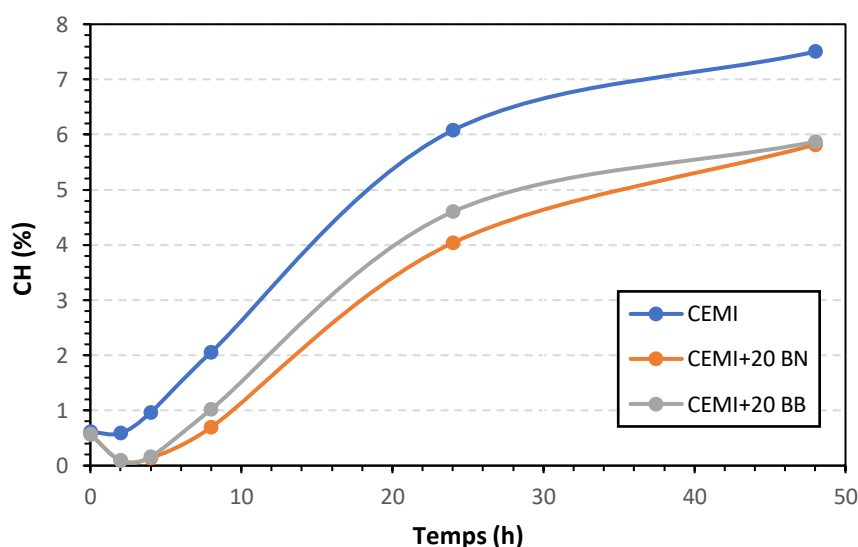


Figure 37: Effet de traitement à l'eau bouillante sur la teneur en portlandite

II.1.1.3. Influence du traitement chimique

La figure 38 montre que l'hydratation des échantillons de ciment contenant le bois traité chimiquement par NaOH a réagi de la même manière que le bois naturel et le bois traité à l'eau bouillante durant les 5 premières heures et à partir de ce temps la portlandite commence à précipiter. D'après les résultats le rendement de la portlandite a augmenté. En comparant en composites cimentaire en bois naturel et en bois bouillie. Cette augmentation est liée au traitement alcalin qui élimine une certaine quantité de lignine, de cire et des huiles couvrants la paroi cellulaire de la fibre et qui contribuent majoritairement à l'inhibition de processus d'hydratation du coulis de ciment.

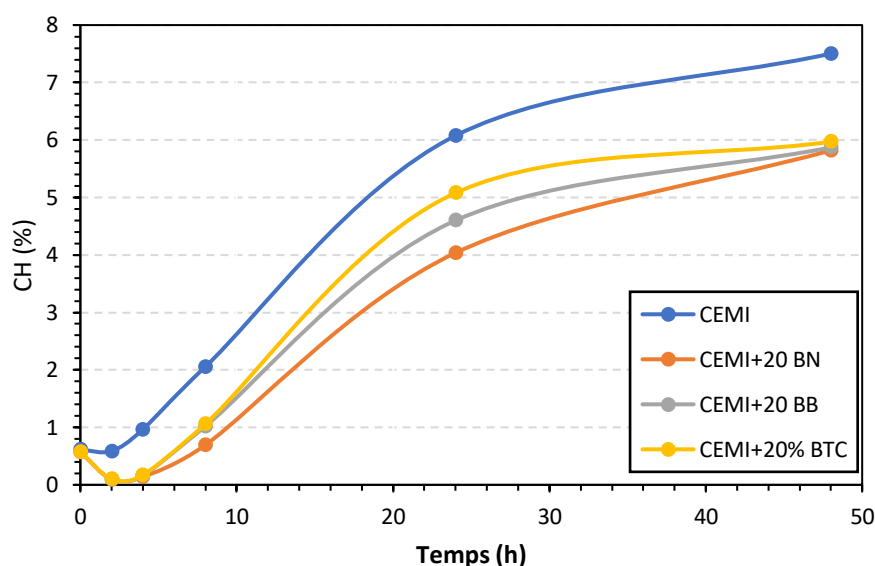


Figure 38: Effet du traitement chimique par NaOH sur la teneur en portlandite

II.1.2. Influence sur le carbonate de calcium

Un autre paramètre important à analyser est la carbonatation du ciment hydraté durant le stoppage d'hydratation et le séchage d'échantillon. (Silva et al. 2002) ont montré qu'il existait une relation entre la diminution de la quantité de portlandite et l'augmentation du carbonate de calcium en utilisant un copolymère éthylène / vinyle acétate dans une matrice cimentaire.

Pour déterminer l'effet de la poudre de bois d'eucalyptus sur le carbonate de calcium, nous avons quantifié la perte de masse liée à la libération de CO_2 par analyse thermique (ATG) pour chacune des formules.

II.1.2.1. Influence de la teneur en poudre d'eucalyptus

L'analyse de la phase CaCO_3 , présentée sur la figure 39, montre que le ciment témoin CEMI, la quantité de CaCO_3 augmente jusqu'à 8 h d'hydratation. Cette augmentation dépend des conditions de séchage des échantillons.

En présence de la poudre de bois naturel, la quantité de carbonate de calcium est supérieure à celle du ciment témoin CEMI. A partir de 8 h d'hydratation le pourcentage massique de phase carbonatée augmente avec la concentration en poudre de bois d'eucalyptus. Compte tenu des écarts types, il est difficile de comparer les différents composites. Le taux de carbonate de calcium semble identique quelle que soit le pourcentage de poudre de bois ajouté .

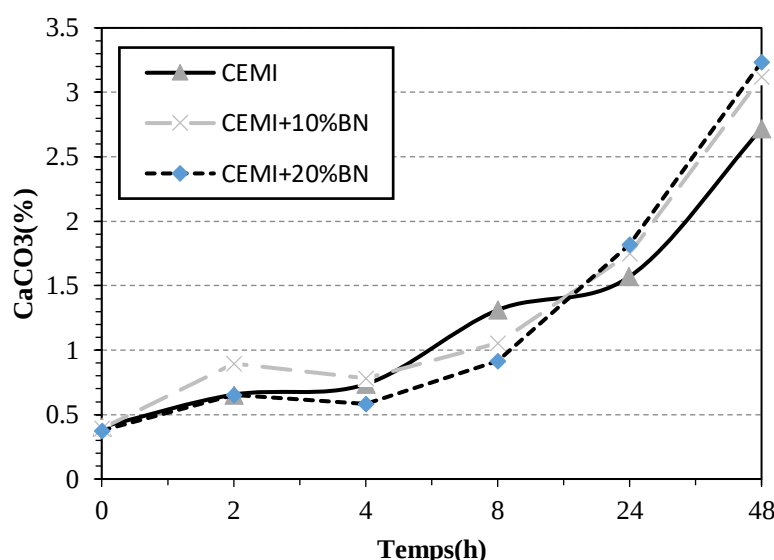


Figure 39: Influence de la teneur en bois sur CaCO_3 en fonction du temps.

Pour analyser la corrélation entre l'inhibition de formation de la portlandite et l'augmentation de la teneur en carbonate de calcium CaCO_3 , pour chaque stoppage d'hydratation, la différence de teneur en portlandite (ΔCH) et en carbonate de calcium (ΔCaCO_3) est calculée entre les mélanges bois-ciment et le ciment témoin par les formules suivantes :

$$\Delta\text{CH}(\text{mol/g}) = (\text{CH composite } (\%) - \text{CH ciment } (\%))/ (100 * \text{MCH})$$

$$\Delta\text{CaCO}_3(\text{mol/g}) = (\text{CH composite } (\%) - \text{CH ciment } (\%))/ (100 * \text{M}\text{CaCO}_3)$$

CH ciment (%), CaCO_3 ciment (%), CH composite (%) et CaCO_3 composite (%) correspondent à la quantité de portlandite et de carbonate de calcium dans le ciment et dans le composite bois /ciment, MCH et MCaCO_3 sont les poids moléculaires de la portlandite et du carbonate de calcium respectivement.

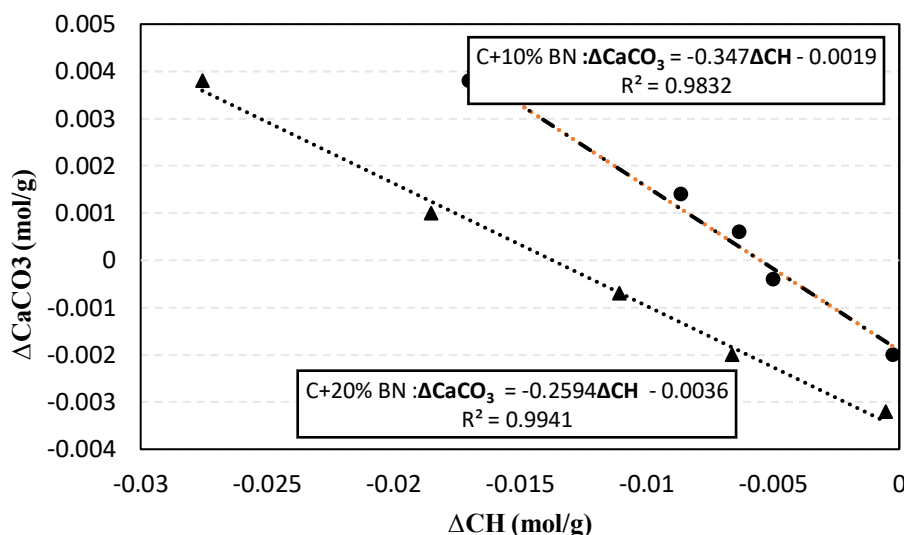


Figure 40:Corrélation entre la diminution de la teneur en portlandite et l’augmentation de la carbonatation.

La figure 40 montre qu’avec des teneurs de 10% et 20% en poudre de bois d’eucalyptus la valeur de la pente respectivement -0.25 et -0.34, ce qui explique qu’environ 25% à 34% de la portlandite non formée conduit à un excédent de carbonatation. D’après les équations (1,2), un déficit en portlandite CH serait imputable à la carbonatation.

$$\Delta\text{CaCO}_3 = -0.347\Delta\text{CH} - 0.0019 \text{ avec } R = -0.9832^* \quad (1)$$

$$\Delta\text{CaCO}_3 = -0.259\Delta\text{CH} - 0.0036 \text{ avec } R = -0.9970^{**} \quad (2)$$

II.1.2.2. Influence du traitement à l’eau bouillante

L’analyse de la phase CaCO_3 , présentée sur la figure 41, montre que le coulis du ciment et le mélange bois–ciment, la quantité de CaCO_3 augmente en fonction du temps d’hydratation, La quantité des phases carbonatées a augmenté dans les composites à renfort bois. D’après les corrélations les écarts types sont proches, il est difficile de comparer les différents composites. Le taux de carbonate de calcium semble identique, aussi bien pour les composites contenant le bois naturel que pour ceux dont le bois est traité .

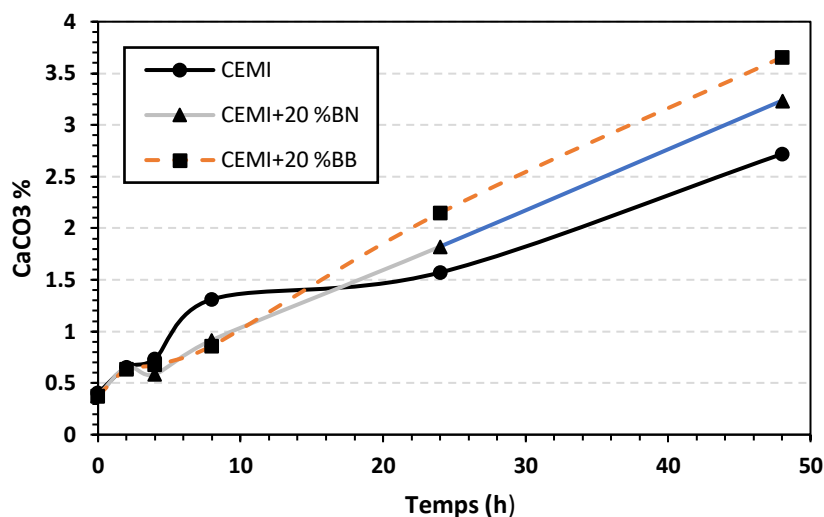


Figure 41: Influence de traitement à l'eau bouillante sur CaCO_3 en fonction du temps.

La figure 42 montre la corrélation entre la portlandite déficitaire (ΔCH) et le carbonate supplémentaire (ΔCaCO_3). D'après la valeur des pentes qui corrélaient les 2 phases sont -0,25 (BN) et -0,32 (BB), ce qui signifie que le traitement à l'eau bouillante entraîne une légère augmentation de phénomène de carbonatation supplémentaire par rapport au bois naturel.

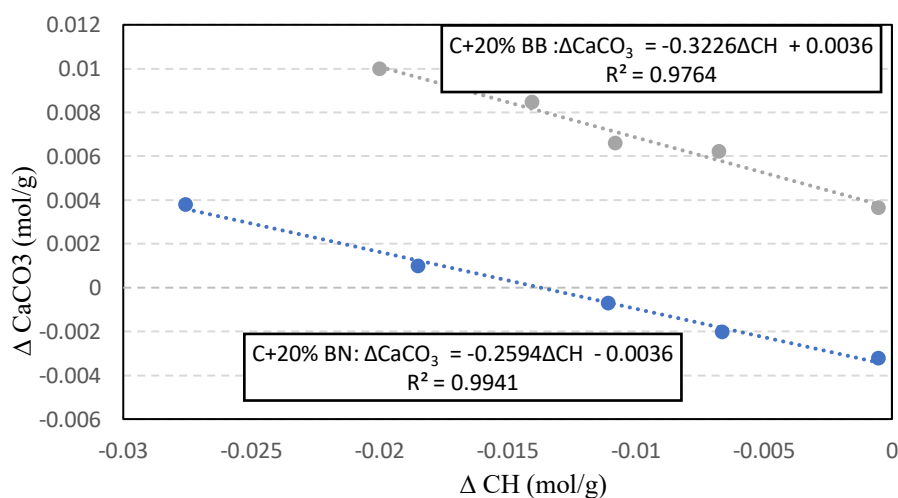


Figure 42: Corrélation entre la diminution de la teneur en portlandite et l'augmentation de la carbonatation.

II.1.2.3. Influence de traitement chimique par NaOH

La figure 43, indique que le traitement alcalin a augmenté la teneur de carbonate de calcium

par rapport aux deux autres composites (bois naturel et bois traité à l'eau bouillante) à celle du ciment témoin.

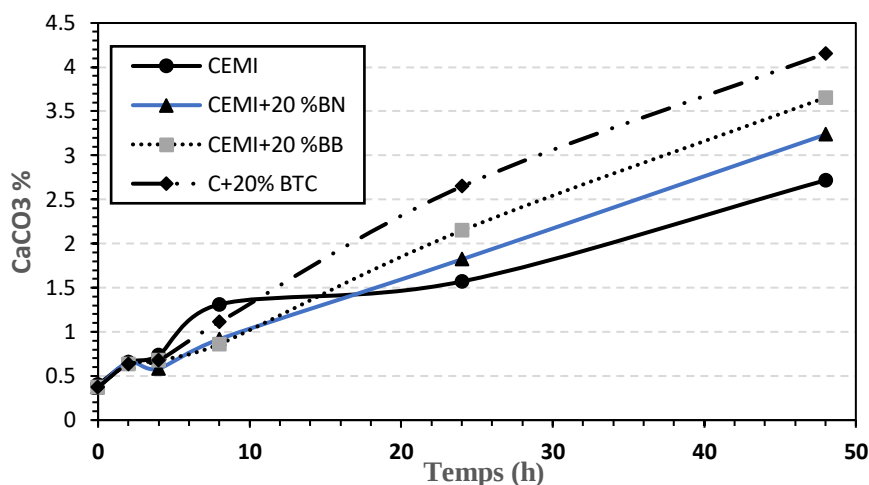


Figure 43: Influence de traitement alcalin sur CaCO_3 en fonction du temps.

La corrélation entre la portlandite (ΔCH) et le carbonate supplémentaire (ΔCaCO_3), obtenue sur la figure 44, montre que les 3 formulations présentent des comportements semblables. Les pentes corrélant ces 3 phases sont -0.25 (BN), -0.22 (BTC) et -0.32 (BB). Cela signifie que les traitements du bois n'arrêtent pas de phénomène de carbonatation supplémentaire par rapport au bois naturel.

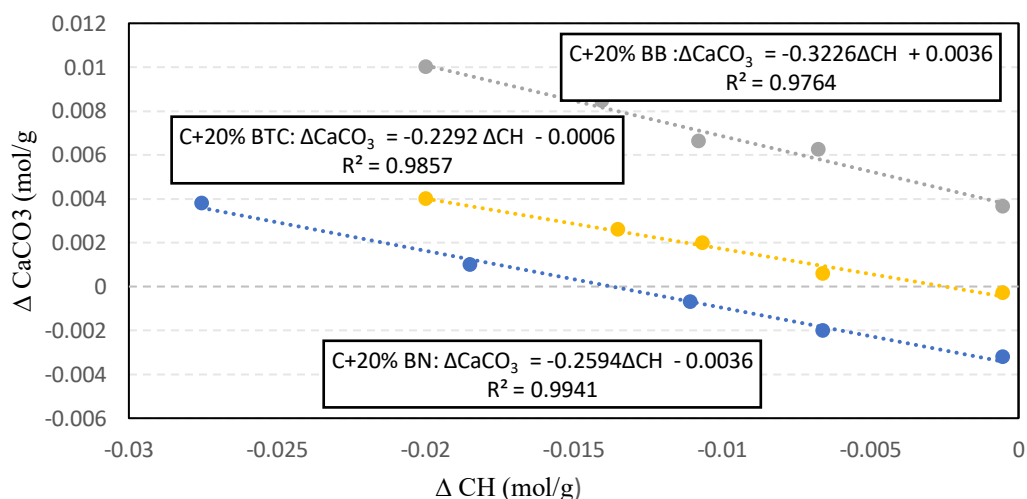


Figure 44: Corrélation entre la diminution de la teneur en portlandite et l'augmentation de la carbonatation.

II.2. Influence du bois d'eucalyptus sur l'hydratation des phases aluminates

II.2.1. Influence de la teneur du bois d'eucalyptus naturel sur les teneurs en gypse et ettringite

La quantification de gypse et l'ettringite nécessite une analyse de thermogramme localisée à la zone 110-170 °C. Les deux premiers pics de thermogramme (Figure 35) correspondant à la décomposition de l'ettringite et du gypse jusqu'à 4 heures d'hydratation, Au-delà de 4 heures, le pic de décomposition des CSH se superpose à celui de l'ettringite. La quantification des phases devient délicate suivant ODLER et al (Odler, I., & Abdul-Maula 1984) .

On constate d'après les résultats de quantification des courbes ATG des deux premières pics (Fig. 45,46) ; qui correspondent respectivement au pourcentage massique de décomposition de gypse et le pourcentage massique d'ettringite en fonction du temps d'hydratation. La présence de poudre de bois d'eucalyptus modifie la consommation du gypse et ce comportement dépend du pourcentage de poudre de bois.

D'après la figure 45. Les composites cimentaires en bois, la décomposition du gypse est accélérée, par rapport au ciment pur CEMI, durant les 4 première heures suite au sucre de bois qui catalyse la réaction d'hydratation des phases aluminates.

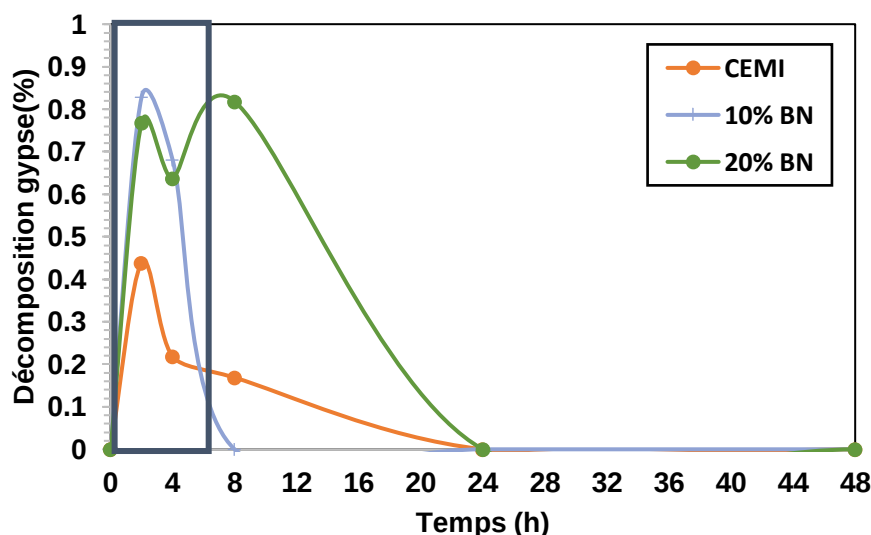


Figure 45: : Influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur la décomposition en gypse

La figure 46, de la teneur en ettringite devrait confirmer les résultats obtenus en consommation du gypse.

Durant les 4 premières heures d'hydratation, la teneur en ettringite n'est pas affectée par la présence de poudre de bois d'eucalyptus. Après 4 heures d'hydratation, la teneur en ettringite des composites à 10% en bois est similaire à celle du ciment témoin, alors qu'à une teneur de 20% en bois, la teneur en ettringite diminue. La teneur en ettringite diminue lorsque la concentration en bois augmente.

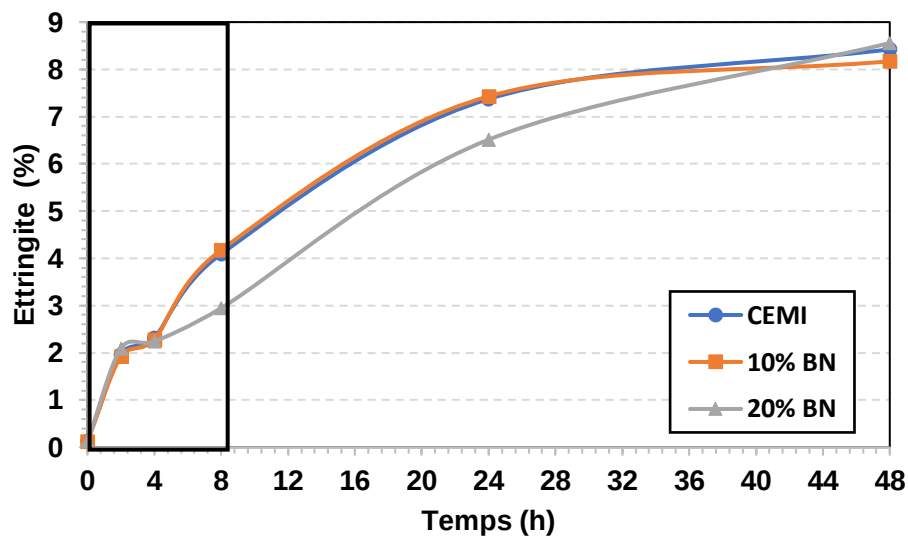


Figure 46: Influence de poudre d'eucalyptus sur la teneur en ettringite

II.2.2. Influence du traitement à l'eau bouillante et traitement alcalin sur les teneurs en gypse et ettringite

La figure 47 représente l'évolution de la teneur en gypse en fonction du temps d'hydratation. L'évolution de la décomposition de gypse pour les bois traités à l'eau bouillante et celui par NaOH sont presque similaires. Le bois naturel et le bois traités ont modifié la consommation de gypse

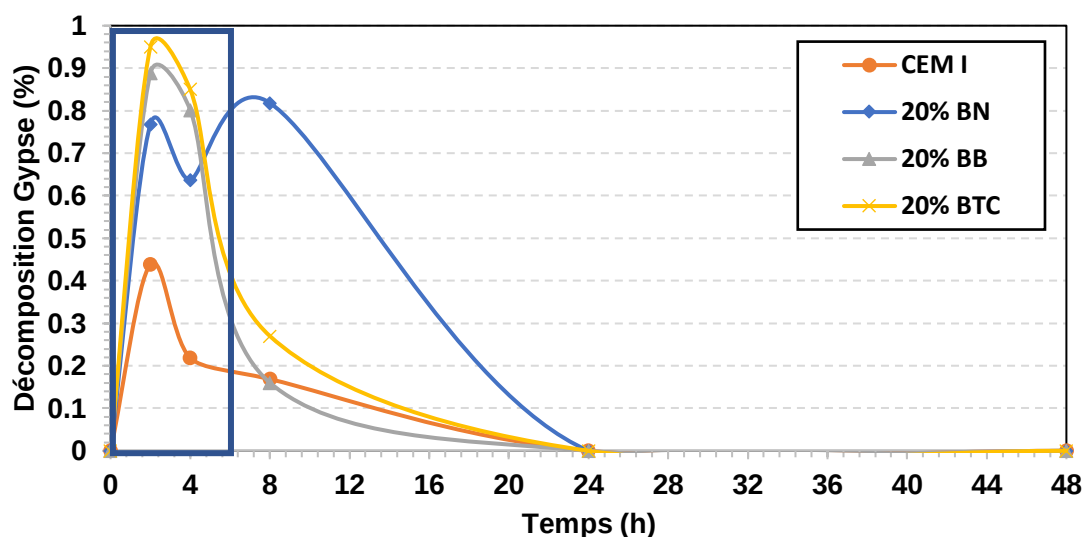


Figure 47: Influence des traitements de bois sur la décomposition en gypse

La figure 48 représente l'évolution de la composition en ettringite durant les 48 premières heures d'hydratation. En présence de bois, les teneurs en ettringite sont inférieures à celles du ciment témoin malgré une consommation du gypse plus élevée.

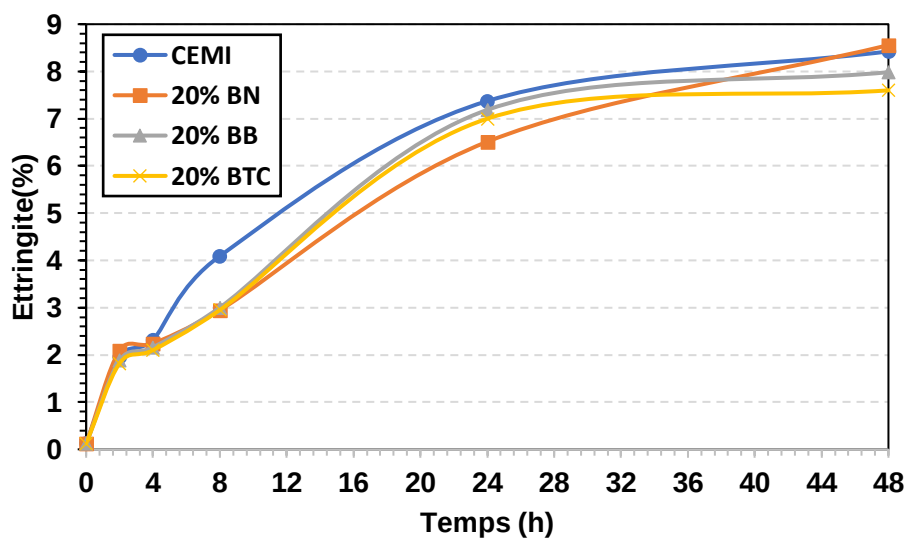


Figure 47: Influence des traitements de bois sur la teneur en ettringite

II.3. Conclusion sur l'hydratation des phases aluminates

L'analyse des phases aluminates montre que la poudre de bois d'eucalyptus modifier la consommation de gypse. Les hémicelluloses de bois jouent le rôle d'un catalyseur ce qui accélère la décomposition de gypse. On remarque que le traitement à l'eau bouillante et le traitement chimique par NaOH n'ont pas retardés la décomposition du gypse, malgré la réduction de certaines substances de bois qui inhibent la cinétique d'hydratation.

*Chapitre V : Étude expérimentale du comportement
mécanique et thermique des composites cimentaires à
renfort bois*

Chapitre V : Étude expérimentale du comportement mécanique et thermique des composites cimentaires à renfort bois

L'objectif de ce chapitre est de déterminer le comportement mécanique et thermique du coulis de ciment à renfort bois. Il est constitué de deux parties suivies d'une conclusion. La première partie est consacrée aux résultats des essais de compression et de flexion. La seconde partie de ce chapitre, est dédiée à l'étude du comportement thermique des composites cimentaires. Enfin, une interprétation des résultats sur les essais effectués et conclusion sont présentées.

I. Étude expérimentale du comportement mécanique des composites bois d'eucalyptus -ciment

Dans cette partie, l'étude porte sur l'influence de la poudre de bois d'eucalyptus sur le comportement mécanique de la matrice cimentaire . Les résultats obtenus montrent le degré d'efficacité des traitements sur les propriétés mécaniques de composite.

I.1. Matériau composite à base de poudre de bois d'eucalyptus naturel

Resistance a la compression

Pour caractériser les matériaux, la résistance en compression est une des grandeurs mécaniques les plus utilisées. Elle représente la capacité d'un matériau à résister à l'écrasement. La résistance à la compression est déterminée à partir du protocole expérimental décrit dans chapitre II. Le test permet d'identifier l'influence de bois et les traitements (traitement à l'eau bouillante et traitement alcalin) sur le comportement mécanique du composite.

I.1.1. Influence de la teneur en bois sur la résistance à la compression :

La substitution du ciment par la poudre de bois d'eucalyptus affecte le comportement mécanique du composite. La figure (49) présente une évaluation de la contrainte à la compression à 28 jours d'hydratation à différentes teneurs en bois (0,5,10,15,20%).

Une diminution de la résistance à la compression est observée. En présence de la poudre de bois naturel la résistance en compression diminue de 57.45MPa a 42.6 MPa pour une teneur de 20% en bois. Cette diminution peut être attribué :

- À la dégradation de la matière végétale affectée par l'alcalinité du milieu cimentaire par conséquence un affaiblissement de la résistance à la compression.

- A l'augmentation de la teneur en air dans le composite, qui par conséquence réduit leur compacité, et donc une diminution de résistance à la compression.

Les plus faibles résistances en compression ont été obtenues à des pourcentages élevés en bois, contenant des fortes quantités d'air occlus.

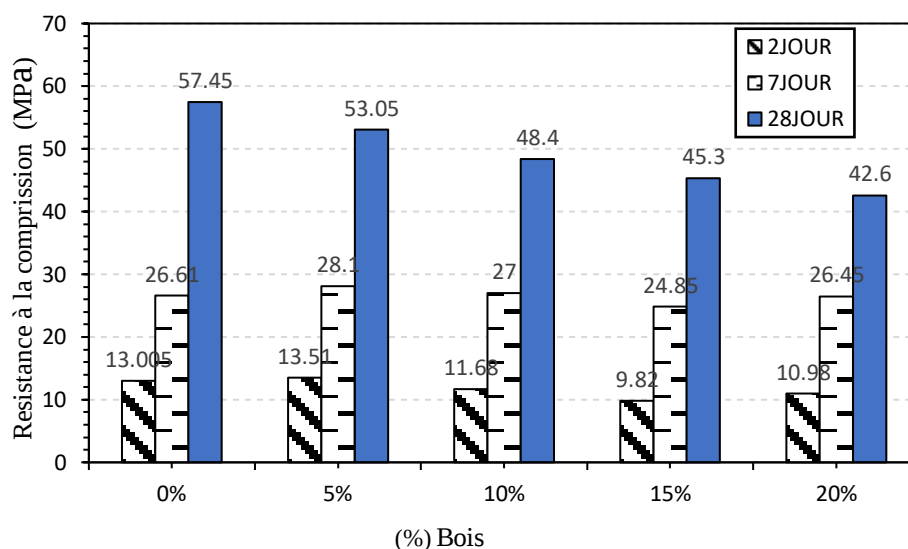


Figure 47: Influence de la teneur en bois naturel sur la résistance à la compression.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (Ajouguim et al. 2019) portant sur l'étude de l'influence des fibres d'alfa (*atip tenacissimit L.*) sur les propriétés mécaniques de composite à base cimentaire. Ils observent une diminution de la résistance à la compression de 64.1 MPa à 52.5 MPa pour différentes fractions volumiques des fibres.

I.1.2. Résistance à la flexion du matériau composite bois naturel-ciment

La résistance à la flexion à 28 jours pour les différentes compositions a été étudiée. L'histogramme de résistance en flexion est présentée dans la figure (50), nous observons une augmentation progressive en flexion pour atteindre une valeur maximale de 4.91 MPa à 5% en bois à 28 jours, une diminution négligeable pour les composites à des teneurs supérieures en bois.

Le mortier témoin a une résistance en flexion de 2.63 MPa, l'incorporation de la poudre de bois d'eucalyptus a augmenté la résistance en flexion. Un comportement similaire a été observé par Blankenhorn (Blankenhorn et al. 2001) en utilisant des bois feuillus et résineux dans une matrice cimentaire.

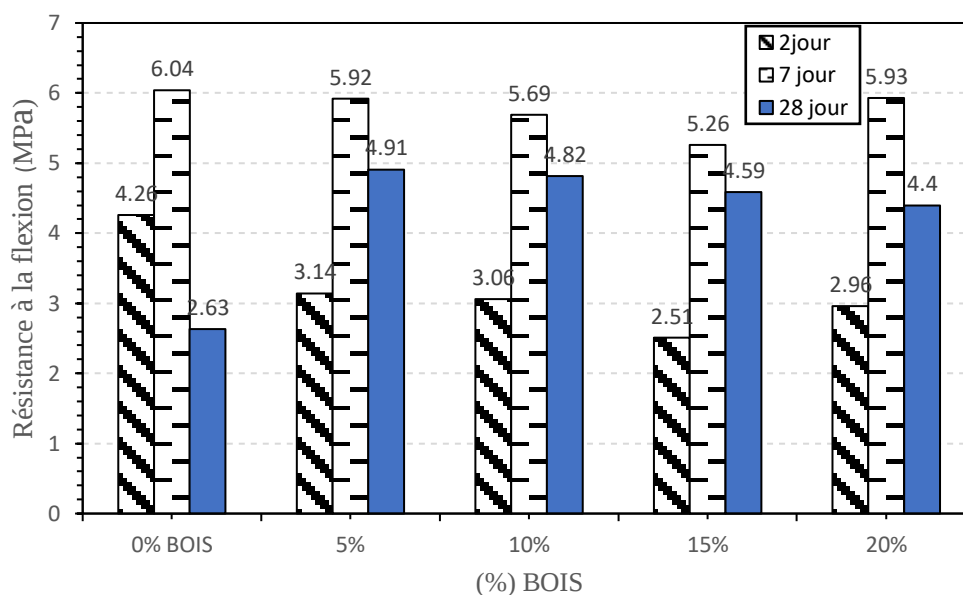


Figure 48:Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en bois

A 5% en bois d'eucalyptus la résistance en flexion est de l'ordre de 4.91 MPa, plus important que celle rapportée par Touloum. (Touloum et al. 2016), pour une teneur de 8% en bois de palmier dattier.

Le gain de résistance en flexion de composite bois d'eucalyptus-ciment traduit un transfert de charge efficace et une bonne adhésion entre le renfort et la matrice cimentaire.

I.1.3. Masse volumique du matériau composite

La figure 51, représente l'évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois naturel à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau pendant 2,7,28 jours. On remarque que l'ajout de poudre de bois réduit considérablement la masse volumique du matériau composite, et que la masse volumique apparente diminue en fonction de l'ajout de poudre de bois. La valeur maximale de la masse volumique apparente est obtenue pour une teneur de 5% qui est de 1797 kg/m³. Ceci est prévisible car la masse volumique du bois d'eucalyptus est nettement inférieure à celle du ciment.

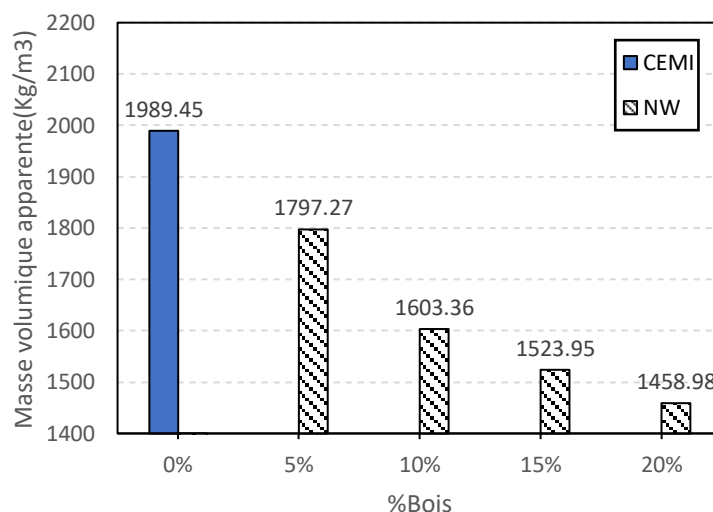


Figure 49:Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois naturel.

I.2. Matériau composite à base de la poudre de bois d’eucalyptus traité à l’eau bouillante

I.2.1. Influence du traitement à l’eau bouillante sur la résistance à la compression

Le traitement de renfort est une stratégie multi variable utilisée pour améliorer la surface de contact entre le bois et le ciment, et réduire le phénomène de retard de prise .

Le traitement à l’eau chaude et bouillie, consiste à éliminer certains sucres hydrosolubles; qui libérés du bois en présence d’eau, entraînent un retard d’hydratation et affectent la prise et durcissement du ciment. D’après (Fertikh et al. 2011), l’ébullition élimine complètement la présence de sucres et offre au composite une hydratation comparable à un mortier ordinaire.

D’après les résultats présentés sur la figure (52), le traitement à l’eau bouillie n’a pas montré une efficacité à la résistance en compression et ces résultats sont similaires à la littérature (Sharhzad et al. 2011) en utilisant les bois durs et tendres et ont observé que la résistance à la compression diminue pour les fibres naturelles et traitées.

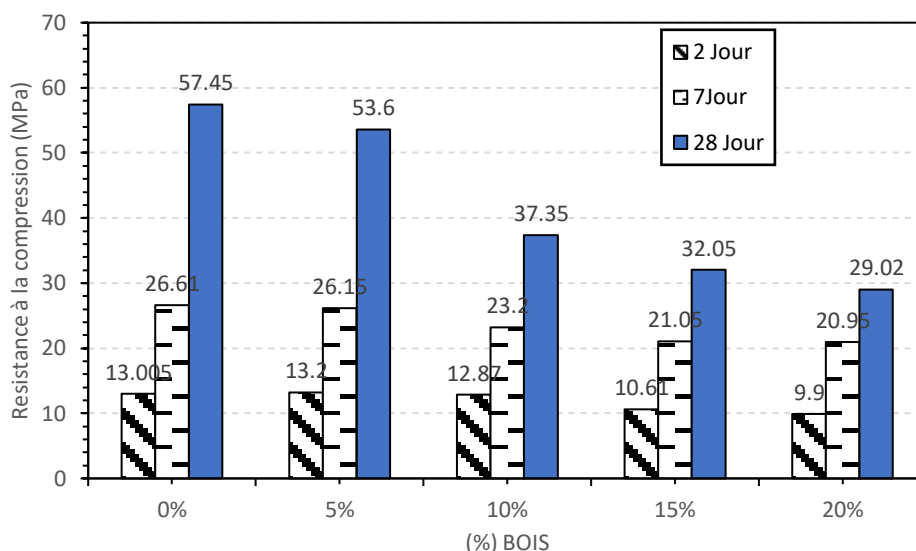


Figure 50: Influence du traitement à l'eau bouillante sur la résistance à la compression

I.2.2. Résistance à la flexion du matériau composite

Le traitement de la poudre par l'eau bouillie améliore la résistance à la flexion jusqu'à 15% par rapport au bois naturel. La valeur maximale obtenue 6.26MPa à 10% en bois environ 58% par rapport au coulis de ciment. (Figure 53).

Le traitement à l'eau bouillie a montré son efficacité (Nasser RA. 2010) en utilisant le bois de palmier dattier. La résistance à la flexion des composites à 5% en poudre de bois d'eucalyptus est plus importante que celle rapportée par (Yahiaoui Lamia 2011) avec la même teneur en fibre de diss. La modification de résistance à la flexion montre une amélioration de comportement à l'interface entre le bois et le ciment.

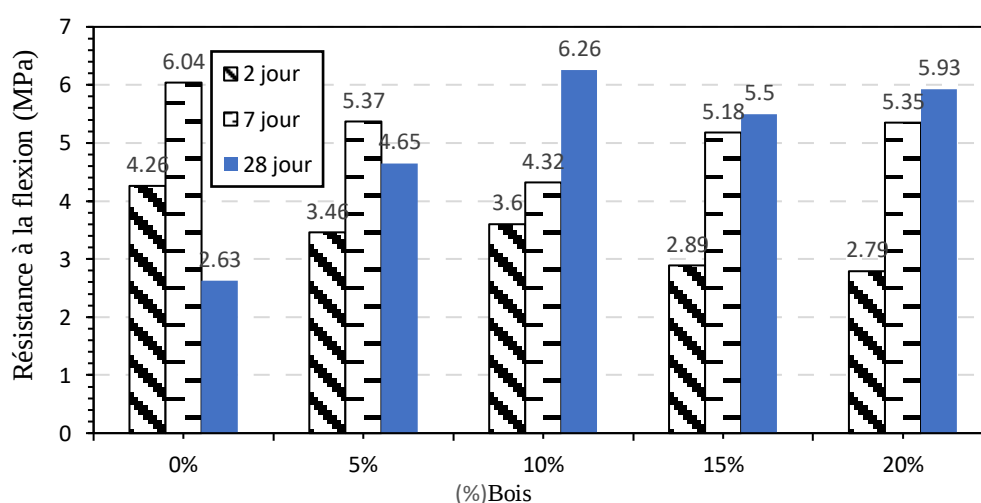


Figure 51: Influence du traitement à l'eau bouillante sur la résistance à la flexion

I.2.3. Masse volumique du matériau composite

La figure 54 présente l'évolution de la masse volumique apparente en fonction de la teneur en bois traité à l'eau bouillante par référence au bois naturel et au coulis de ciment.

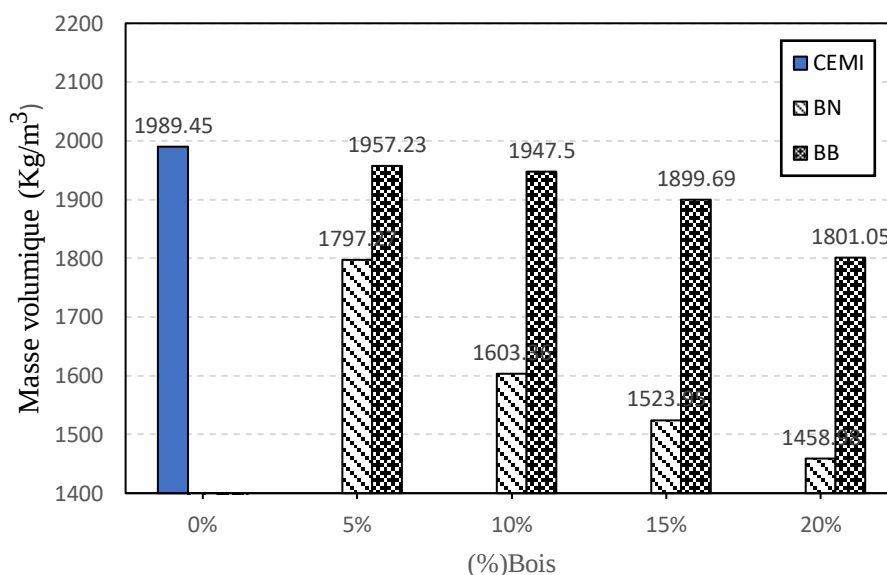


Figure 52:Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois bouillie.

Les résultats montrent que le traitement de bois à l'eau bouillante diminue également la masse volumique des composites. On remarque que La chutes de la masse volumique des composites en bois naturel est supérieur à celle en bois traite à l'eau bouillante. A titre exemple, à une concentration de 5% en bois traité à l'eau bouillante la masse volumique apparente est de 1957.23kg/m³.

I.3. Matériau composite à base de poudre de bois d'eucalyptus traité par NaOH

I.3.1 Influence de traitement alcalin sur la résistance à la compression :

Le traitement alcalin réduit la quantité de sucre et augmente la résistance à la compression, ce traitement élimine la pectine, l'hémicellulose et la cire. (Boix et al., 2020). Les propriétés mécaniques sont évaluées par rapport aux composite obtenus par le coulis de ciment.

L'effet du traitement chimique de la poudre de bois d'eucalyptus sur les propriétés mécaniques des composites est plus fort que l'effet de traitement à l'eau bouillie. Pour 10% et 15% en (BTC) une amélioration de la résistance d'environ 24% et 10% respectivement par rapport au (BB). Le bois d'eucalyptus traité ou brut dans une matrice cimentaire dégrade la résistance en compression.

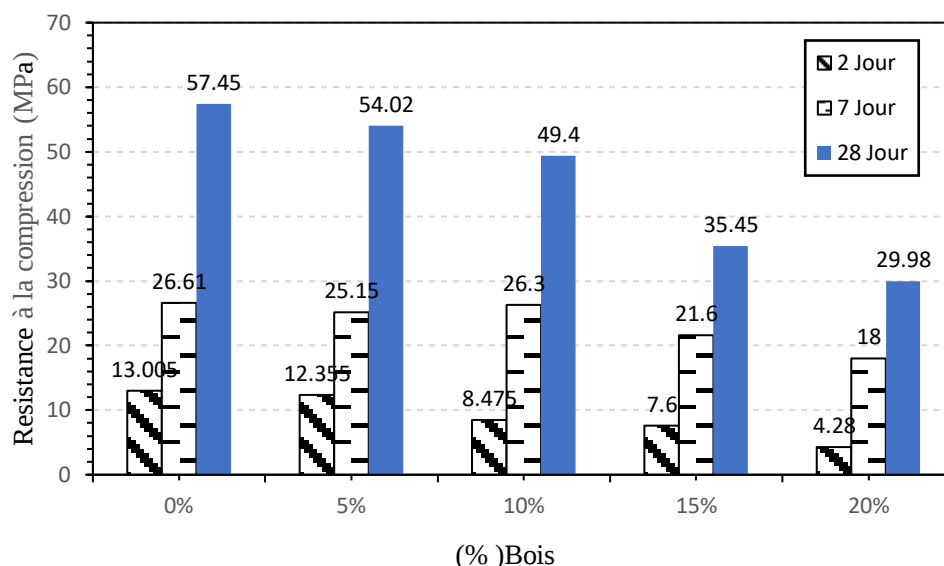


Figure 53: Influence du traitement chimique sur la résistance à la compression.

I.3.2 Résistance à la flexion du matériau composite

La figure (56) représente la résistance en flexion des composites en bois d'eucalyptus traité chimiquement par NaOH. Les résultats montrent que l'effet de traitement est plus important que l'effet de l'ébullition, ceci a été constaté aussi par (Yahiaoui Lamia 2011) en utilisant les fibres de diss. Sedan (Sedan .2007) a constaté une augmentation de 39 % de la résistance en flexion des composites en fibres de chanvre traité par NaOH par rapport à un composite a fibres non traitées. L'auteur explique ces résultats par le fait que la soude a dégradé les impuretés, les hémicelluloses et les graisses à la surface de la fibre. Les fibres de chanvre sont donc plus homogènes, ce qui améliore leur adhérence avec la matrice. Donc le traitement par l'hydroxyde de sodium a permis d'éliminer une grande partie des pectines et lignines présentes entre les microfibrilles, ce qui facilite le transfert des efforts entre elles, et par conséquent une amélioration de la résistance en flexion.

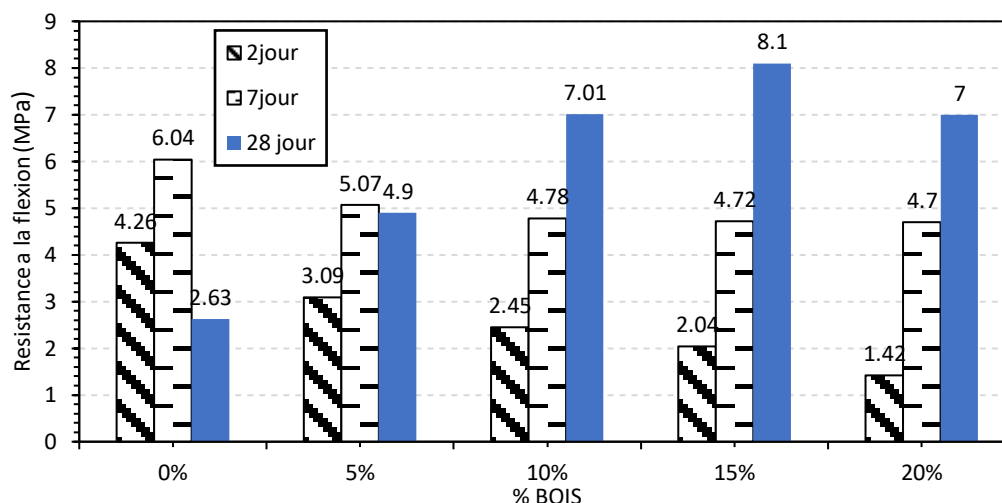


Figure 54: Influence du traitement chimique sur la résistance à la flexion

I.3.3 Masse volumique du matériau composite

La figure 57 présente l'évolution de la masse volumique apparente en fonction de la teneur en bois traité chimiquement par NaOH par référence au bois naturel et au coulis de ciment.

C'est similaire au composite cimentaire à renfort bois (naturel, traité à l'eau bouillante), plus la concentration en bois est élevée plus la masse volumique est faible. On remarque que la chute de la masse volumique des composites en bois naturel est supérieure à celle en bois traité par NaOH. A une concentration de 5% en bois traité par NaOH la masse volumique apparente est 1965.74 kg/m^3 , soit une chute d'environ 9% pour le composite en bois naturel.

Une similarité de comportement est observée sur La masse volumique des composites en bois traité à l'eau bouillante et les composites en bois traité par NaOH.

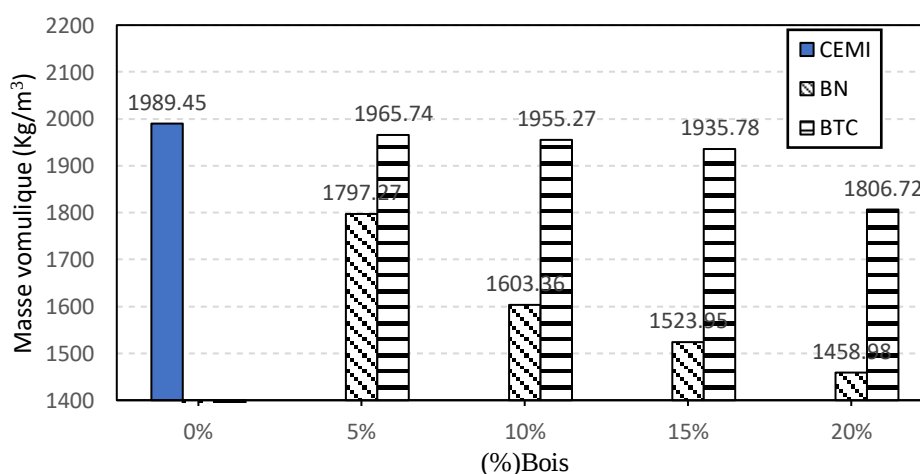


Figure 55: Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en bois traité chimiquement.

I.4. Conclusion

D'après les résultats des essais effectués sur le matériau composite ciment /bois d'eucalyptus ; on a constaté que la résistance à la compression est plus affectée que la résistance à la flexion, et que le traitement à l'eau bouillante et le traitement chimique par NaOH n'apporte pas d'amélioration à la résistance en compression, alors on remarque une amélioration de la résistance en flexion.

Les chutes de la masse volumique et de la résistance à la compression du matériau ciment /bois d'eucalyptus sont plus importantes avec le bois naturel comparativement avec le bois traité à l'eau bouillante et le bois traité par NaOH. A des concentrations supérieures à 5% en bois, l'adhérence entre le renfort et la matrice est relativement faible.

A une faible concentration en bois (5%) la masse volumique apparente est de l'ordre de 1975 kg/m^3 , comparativement à des bétons légers isolants, elle varie entre 1000 et 1400 kg/m^3 , une valeur qui dépasse les normes.

II. Essai d'absorption d'eau par immersion et par capillarité

II.1. Absorption capillaire

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ sur une durée de 90 minutes suivant la norme EN 480-5. L'influence de bois d'eucalyptus et les différents traitements sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur la figure 58. Les résultats graphiques montrent une augmentation de l'absorption avec le temps quel que soit le mélange. Cette augmentation est liée directement à la porosité du matériau. En général, plus la compacité est élevée plus l'absorption capillaire est faible.

Dans notre cas, on observe que les compositions moins poreuses (5%,10%) absorbent une quantité d'eau plus élevée. Les éprouvettes qui ont une concentration de 20 %, l'absorption capillaire est faible les pores des composites se comportent comme des passoirs et par conséquent l'eau absorbée s'égoutte facilement à travers les pores existants dans les éprouvettes.

Le phénomène d'absorption diminue pour les fibres traitées à cause de l'élimination des couches cireuse et l'augmentation de la force d'adhésion entre les fibres et la matrice.

Nos résultats d'absorption capillaire s'approchent de ceux donnés par (Merabti, 2005) en utilisant des déchets de liège.

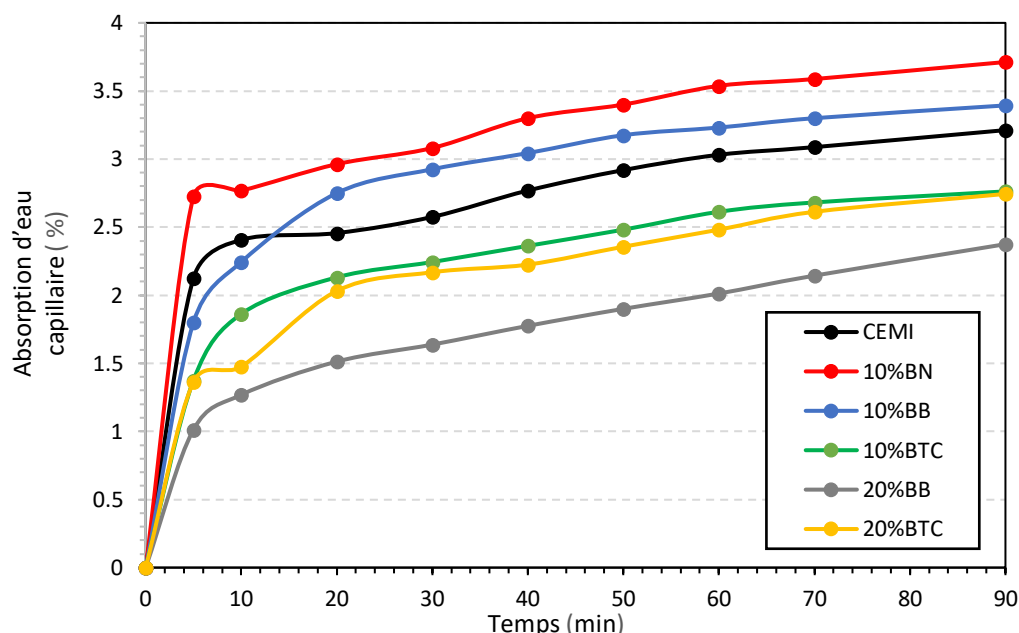


Figure 56:Évolution de l'absorption capillaire des composites bois-ciment en fonction du temps

II.2. Absorption par immersion

Le pourcentage d'absorption d'eau de coulis de ciment après 24 heures d'immersion dans l'eau est d'environ de 25%. La présence de la poudre de bois naturel dans une matrice cimentaire augmente le pourcentage d'absorption d'eau et qui est proportionnel à la concentration en bois. On remarque que l'effet de traitement par l'eau bouillante et par NaOH est peu significatif et que l'absorption d'eau par immersion dépend de pourcentage de bois présent dans la matrice cimentaire. D'après ces résultats, on conclut que l'absorption d'eau par immersion est très élevée ce qui nous montre que la porosité de ce matériau est importante et par conséquent une dégradation de la durabilité de matériau composite et également la perte des propriétés thermique du matériau.

Tableau 10: Pourcentage d'absorption d'eau par capillarité des différentes teneurs et traitements de bois.

	Absorption (%) par immersion après 24 h				
CEMI	25.23				
5% BN	27.46	5% BB	28	5% BTC	29
10%BN	28.8	10%BB	31	10%BTC	32.94
15% BN	29.48	15% BB	33.39	15% BTC	33.67
20% BN	33.16	20% BB	34	20% BTC	33.9

III. Essai thermique sur le matériau composite bois d'eucalyptus -ciment

Les analyses de la conductivité thermique des composites bois d'eucalyptus -ciment ont été réalisés à température ambiante (25°C) et à pression atmosphérique.

La figure 59 illustre la variation de la conductivité thermique des différents composites en bois. On remarque que la conductivité thermique diminue en augmentant le pourcentage de poudre de bois. Pour les composites à 15% de BN, la conductivité thermique diminue de 0.603 W.m-1K -1 pour le mortier de référence jusqu'à 0, 41 W.m-1K -1 pour le bois naturel, 0.40 W.m-1K -1 pour le bois traité à l'eau bouillante et 0.42 W.m-1K -1 pour le bois traité par NaOH. D'après les résultats, on remarque que l'effet des traitements est peu significatif et que la conductivité thermique des composites dépend de la concentration d'ajout

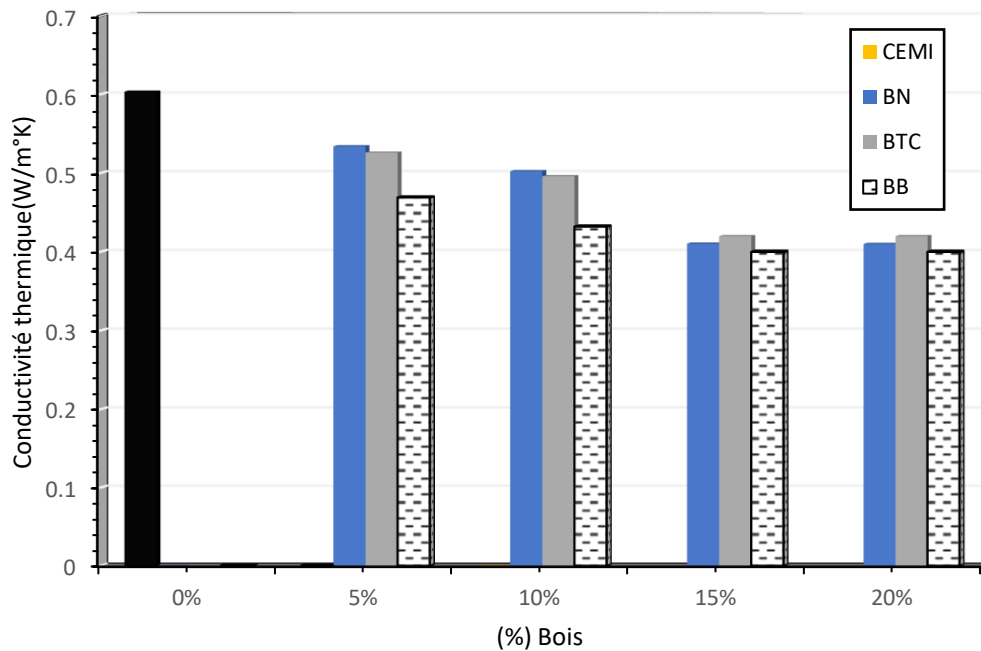


Figure 57: La conductivité thermique en fonction de concentration en bois nature, traité à l'eau bouillante et le bois traité par NaOH.

En effet, la diminution de la conductivité thermique du composite bois-ciment dépend de deux facteurs :

- La porosité créée par la matière végétale et qui augmente avec la teneur massique en bois et par conséquent une diminution de la conductivité thermique de composite (Boumhaout et al. 2017).
 - Des conductivités thermiques des principaux constituants injectés dans le mélange. Le bois d'eucalyptus incorporé possède une faible conductivité. La quantité du ciment présente un impact direct sur la conductivité thermique du composite, la conductivité thermique est d'autant plus importante que le dosage en ciment est important. Ce résultat est vérifié quel que soit le type de matière végétale utilisée dans une matrice minérale (Bentchikou et al. 2017) (Espinoza Herrera 2009) (Touloum et al. 2016) (Lahouioui 2019)
 - Pour la concentration 15 % en bois d'eucalyptus, on enregistre le plus faible coefficient de conductivité thermique de 0.41W/m²K, Au-delà de ce pourcentage, elle devient constante pour 20%, de ce fait, on peut limiter le pourcentage d'ajout. À 15%

et 20% d'ajout la résistance à la compression des composites est faible alors que la résistance à la flexion est améliorée, donc ce matériau pourra être utilisée dans le domaine de bâtiment, notamment, le recouvrement des murs.

III.1. Comparaison du matériau composite ciment-bois d'eucalyptus avec d'autres matériaux isolants

Les valeurs des coefficients de la conductivité thermique des différents composites sont représentées dans le tableau 11, ou sont également indiquées les valeurs de ce coefficient pour d'autres matériaux composites

L'utilisation de bois d'eucalyptus donne un matériau léger de masse volumique varie entre 1500 et 1800Kg/m³ pour les composites à 15% et 20% en bois. La masse volumique des composites en bois d'eucalyptus sont comparables à celle des bétons de granulats légers.

La plus faible conductivité thermique est obtenue à des concentration de 15% et 20% en bois, ces résultats sont meilleurs que le ciment a renfort de bois dattier, ciment -sol-sable-fibre de noix de coco.

La conductivité thermique des composites élaboré peut être comparée avec un béton cellulaire.

Le matériau composite à base du ciment et de bois d'eucalyptus, est un matériau léger, isolant, respectueux de l'environnement qui peut être utilisé dans le recouvrement des murs en intérieur comme à l'extérieur.

Tableau 11: Le coefficient de la conductivité thermique et la résistance à la compression de quelques matériaux en fonction de la masse volumique.

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Rc (MPa)	λ (W/m [°] .k)	Reference
Matériaux composites				
• Ciment-sol-sable-fibres de noix de coco	1587	3.955	0.651	(Khedari, 2001)
• Ciment- sable- fibres cellulosiques	1150	3	0.30	(Benchikou . 2000)
• Ciment-bois de palmier dattier (8%).	-	45,34	0,67	(Touloum . 2016)
• Ciment–sol-sable-fibre de durian	1456	3.29	0.35	(Khedari,2001)
• Gypse/bois de palmier dattier (10 % masse)	-	-	0,17	(Chikhi, 2013)
-Bétons cellulaires	1200	4-5	0.40	(Khorami .2011)
Béton de mousse	600-1200	-	0.50	(Mamillan. 1983)
Matériau composite 15% BN	1524	45.3	0.41	Présente étude
Matériau composite 15% BB	1900	32.5	0.4	//
Matériau composite 15% BTC	1936	35.45	0.42	//
Matériau composite 20% BN	1459	42.6	0.41	//
Matériau composite 20% BB	1801	29.02	0.4	//
Matériau composite 20% BTC	1806	30	0.42	//

IV. Module d'élasticité dynamique

L'évolution du module d'élasticité dynamique des différents composites élaborée obtenus après 28 jours de cure est donnée sur la figure 60.

Les résultats montrent l'existence d'une corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la masse volumique apparente des composites bois-ciment. En effet, plus la masse volumique

des composites est élevée, plus le module d'élasticité dynamique est grand. Donc le coulis de ciment (l'échantillon de référence) qui présente le plus grand module d'élasticité, égal à 35,09 (GPa). La poudre de bois d'eucalyptus a diminué le module d'élasticité dynamique du matériau de 35,09 pour le composite de référence à 24,38 pour (10% BN), et à 20,18 (20% BN). Le traitement de bois à l'eau bouillante et le traitement alcalin ont légèrement modifier le module d'élasticité dynamique et qui respectivement égaux à 31,1 GPa (10% BB), 25 GPa (20% BB), et à 33,09 GPa (10% BTC), 26 GPa (20% BTC).

La présence de bois dans la matrice cimentaire a diminué la rigidité du matériau. Cela est également conforme à l'étude de comportement en compression et en flexion des composites bois-ciment.

Plusieurs auteurs avaient également observé une diminution du module d'élasticité dynamique des mortiers renforcés par la matière végétale, tels que mortiers renforcés par les fibres de jute (Menadi, S. et al, 2013), les mortiers renforcés par des fibres de palmier (Harrat, K., & Queneudec, 2012).

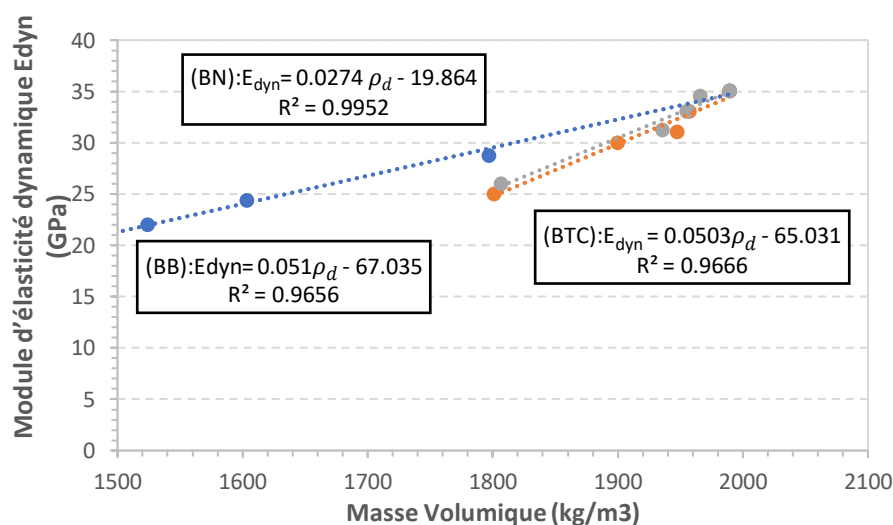


Figure 58: Module d'élasticité dynamique des composites en fonction de la masse volumique

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail réside principalement dans la valorisation des matières premières locales : bois et ciment, et à évaluer la possibilité de l'utilisation de bois d'eucalyptus dans la fabrication d'un matériau composite isolant à matrice cimentaire.

Pour réaliser ces objectifs, nous avons étudié le processus d'hydratation du ciment en présence de bois d'eucalyptus, une bonne connaissance de l'interaction physico-chimique entre ces deux matériaux doit permettre une amélioration du composite. Toute la recherche bibliographique fait plutôt référence au fait que la présence de la matière lignocellulosique dans le ciment conduit à une modification de la cinétique d'hydratation et par conséquent un retard de prise et fissuration du composite.

Notre étude expérimentale a porté sur le bois d'eucalyptus à l'état naturel, et pour améliorer l'hydratation du mélange bois-ciment deux types de traitement de bois ont été réalisés afin de réduire les substances inhibitrices qui retardent la prise du ciment.

Le traitement du bois à l'eau bouillante permet d'enlever les substances organiques (extractibles), libérées par le bois en présence d'eau ; le traitement chimique par NaOH entraîne la dégradation des constituants amorphes présents à la surface des fibres de bois et une rupture de la chaîne cellulosique.

Le suivi d'hydratation a été réalisé en milieu dilué afin d'établir les mécanismes d'interaction, et en milieu concentré avec un rapport E/C proche des conditions réelles afin de suivre l'évolution des différents hydrates.

Les résultats de suivi d'hydratation en milieu concentré par microcalorimètre isotherme a révélé une perturbation de la dissolution des grains de ciment, déterminé par une modification de la période d'induction ; alors que les traitements (traitement à l'eau bouillante et traitement alcalin) ont favorisé l'accélération de la période. Le traitement alcalin est plus efficace que le traitement à l'eau bouillante, ce qui a été montré par une accélération d'hydratation des silicates et aluminates.

Le suivi d'hydratation en milieu dilué montre un retard de précipitation de la portlandite démontré par la suite avec la méthode thermogravimétrique, par le phénomène

de carbonatation et la concentration des ions hydroxyle dans la solution.

La caractérisation mécanique et thermique des composites élaborés nous conduit aux conclusions suivantes :

1. La résistance à la compression est plus affectée que la résistance à la flexion, et ce dernier est améliorée par le traitement alcalin.
2. La masse volumique apparente diminue avec l'ajout de la poudre de bois d'eucalyptus.
3. L'absorption d'eau par immersion est très élevée et dépend de la teneur en bois introduit, les composites poreux absorbent une quantité importante.
4. La conductivité thermique du matériau élaboré varie entre 0.53 à 0.40 W.m-1K-1 selon le dosage de bois.
5. Le module d'élasticité dynamique montre que l'incorporation du bois dans la matrice ciment a diminué la rigidité du matériau.
6. La mise en œuvre de ces composites dans le domaine de la construction est tout à fait envisageable pour la réalisation d'éléments d'isolation qui peuvent être utilisés dans le recouvrement des murs en intérieur comme à l'extérieur pour améliorer le confort des habitations (acoustique et thermique).

Références Bibliographiques

- Ahmad, R., R. Hamid, and S. A. Osman. 2019. "Physical and Chemical Modifications of Plant Fibres for Reinforcement in Cementitious Composites." *Advances in Civil Engineering* 2019.
- Ajouguim, Soukaina et al. 2019. "Modifications of Alfa Fibers by Alkali and Hydrothermal Treatment." *Cellulose* 26(3): 1503–16.
- ALBERTO. 2001. "Influence Des Extractibles d'essences Du Mozambique Sur l'hydratation Du Ciment. Les." *cahiers scientifiques du bois*, 2: . 1-14.
- Barbat.A.. 2009. "Extraction, Caractérisation Chimique Valorisation Biologique de Glucironoxylane de Bois de, Chataignier. Développement de Nouveau Procédé de Dégénération." In *Thèse Doctorat, Université de LIMOGES, Chimie Appliquée – Chimie Des Substances Naturelles*,.
- Beaudoin, James, and Ivan Odler. 2019. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement*. 5th ed. Elsevier Ltd ,246-54. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00005-8>.
- Bentchikou, M., Hanini, S., Silhadi, K., & Guidoum, A. (2007). Elaboration et etude d'un mortier composite a matrice minerale et fibres cellulosiques: application a l'isolation thermique en batiment. *Canadian journal of civil engineering*, 34(1), 37-45. Bensted.J. 1987. "Some Applications of Conduction Calorimetry to Cement Hydration." *Advances in Cement Research* 1(1): 35–44.
- Bentz, D. P. 2008. "A Review of Early-Age Properties of Cement-Based Materials." *Cement and Concrete Research* 38(2): 196–204.
- BIBLIS EJ, Lo CF. 1968. "Sugars and Other Extractives: Effect on the Setting of Southern Pine-Cement Mixtures." *For Prod J* 18(8): 28-34.
- Bishop, M., & Barron, A. R. 2006. "Cement Hydration Inhibition with Sucrose, Tartaric Acid, and Lignosulfonate: Analytical and Spectroscopic Study." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 45(21): 7042–49.
- Boix, E., Gineau, E., Narciso, J. O., Höfte, H., Mouille, G., & Navard, P. 2020. "Influence of Chemical Treatments of Miscanthus Stem Fragments on Polysaccharide Release in the Presence of Cement and on the Mechanical Properties of Bio-Based Concrete Materials." *Cement and Concrete Composites* 105(October 2020): 1–8.
- Le Borgne, T. 2010. "Caractérisation et Quantification Des Éléments Perturbateurs de Prise Lors Du Traitement Des Sols." *Thèse de doctorat, INPL - France*: 224.
- Boustingorry.P. 2002. "Elaboration d'un Matériau Composite à Matrice Gypse et Renfort Bois Fragmenté. Amélioration de La Résistance Au Vissage de Produits Préfabriqués En Gypse.",. *Thèse de l'Ecole des Mines de Saint Etienne, Génie des procédés*,.
- BRUERE, G. M. 1966. "Set-Retarding Effects of Sugars in Portland Cement Pastes." *Nature*,

- 212,(5061): 502-503.
- Cao, Y., S. Shibata, and I. Fukumoto. 2006. "Mechanical Properties of Biodegradable Composites Reinforced with Bagasse Fibre before and after Alkali Treatments." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37(3): 423–29.
- Chikhi, M., B. Agoudjil, A. Boudenne & A. Gherabli. 2013. "Experimental Investigation of New Biocomposite with Low Cost for Thermal Insulation." *Energy and Buildings* 66: 267-273.
- Comparet, C., Nonat, A., Pourchet, S., Guicquero, J. P., Gartner, E., & Mosquet, M. 1997. "Chemical Interaction of Di-Phosphonate Terminated Monofunctional Polyoxyethylene Superplasticizer with Hydrating Tricalcium Silicate." *ACI Symposium Publication* 195.
- Delannoy, G., Marceau, S., Gle, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., ... & Farcas, F. 2020. "Impact of Hemp Shiv Extractives on Hydration of Portland Cement." *Construction and Building Materials* 244: 118300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118300>.
- Doat, Jacqueline. 1978. "Les Tanins Dans Les Bois Tropicaux." *Bois et Forêts des Tropiques* 182(Novembre-Décembre): 37–54.
- Dunstetter, F., M. N. De Noirfontaine, and M. Courtial. 2006. "Polymorphism of Tricalcium Silicate, the Major Compound of Portland Cement Clinker: 1. Structural Data: Review and Unified Analysis." *Cement and Concrete Research* 36(1): 39–53.
- Espinoza Herrera, R. 2009. "Panneaux En Gypse et Particules de Boisrenforcés Avec Du Ciment Portland. Canada." *Thèse de doctorat, Université deLaval*.
- Fargette. C. 1995. "Etude de l'influence Des Extractibles Du Bois Sur l'hydratation Du Ciment." *DEA de l'Ecole des Mines de Saint Etienne, Génie des procédés*.
- Fengel, D., & Wegener, G. (Eds.). 2011. "Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions." *Walter de Gruyter*.
- Fertikh, Salah, Mouloud Merzoud, Fouzi Med Habita, and Amar Benazzouk. 2011. "Comportement Mécanique et Hydrique Des Composites à Matrice Cimentaire et Argileuse à Base de Diss « Ampelodesma Mauritanica »." *XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen*: 188–96.
- Fotsing, J. A. M., & Fokoua, A. D. S. 2012. "Effects of Thermal Modification by the Hot Oil Treatment Process on Some Physical Properties of Two Cameroonian Hardwood Species." *Int. J. Heat. Technol* 30: 43–50.
- Galynker, I., and W. C. Still. 1982. "Influence Du Milieu De Trempe Sur La Cinétique D'hydratation Du Silicate Tricalcique Pe." *Tetrahedron Letters* 23(2): 4461–64.
- Govin, Alexandre, Arnaud Peschard, Emmanuel Fredon, and René Guyonnet. 2005. "New Insights into Wood and Cement Interaction." *Holzforschung* 59(3): 330–35.
- Grandet, G. Arliguie et J. 1985. "Etude Par Calorimétrie De L'hydratation Du Ciment Portland En Presence De Zinc." *Cement and Concrete Research* 15(5): 825-832. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/secondaddendum20081119.pdf.

- Harrat, K., & Queneudec, M. 2012. "Valorisation de Déchets Fibreux Issus de Folioles de Palmiers Dattiers. Influence de La Taille et Du Pourcentage de La Fraction Végétale Sur Les Caractéristiques Physico Mécaniques d'un Mortier Cimentaire." *In Recueil des communications du colloque International Francophone NoMaD 2012, Toulouse, France: Université Paul Sabatier.*: 41-50.
- Hopkins, W. G. 2003. "Physiologie Végétale." *De Boeck Supérieur*.
- Janosik, Steven M. 2005. "Influence De La Temperature De Recuit Sur La Cinetique De L'hydratation Du Silicate Tricalcique P." *NASPA Journal* 42(4): 1.
- Jongvisuttisun, P., Leisen, J., & Kurtis, K. E. 2018. "Cement and Concrete Research Key Mechanisms Controlling Internal Curing Performance of Natural Fibers." *Cement and Concrete Research* 107(February): 206–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.007>.
- van der KERK, G. J. M. 1976. "Organotin Chemistry: Past, Present, and Future." 8: 1–25.
- Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. 2001. "New Lightweight Composite Construction Materials with Low Thermal Conductivity »." *Cement and Concrete Composites* 23: 65–70.
- Khorami, M., & Ganjian, E. 2011. "Comparing Flexural Behaviour of Fibre-Cement Composites Reinforced Bagasse: Wheat and Eucalyptus." *Construction and Building Materials* 25(9): 3661–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052>.
- Kook-Han Kim, Sang-Eun, Jin-Keun Kim, Sungchul Yang. 2003. "An Experimental Study on Thermal Conductivity of Concrete." *Cement Concrete Research* 33.: 363-371.
- De La Grée, G. D., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. 2017. "Assessing the Effect of CaSO₄ Content on the Hydration Kinetics, Microstructure and Mechanical Properties of Cements Containing Sugars." *Construction and Building Materials* 143: 48–60.
- Lahouioui, Marwa. 2019. "Elaboration et Évaluation Des Propriétés Physico-Thermiques et Acoustiques de Nouveaux Éco-Composites à Base de Bois de Palmier." *these de doctorat présentée à l'universite de gabes ecole nationale d'ingenieurs de gabes*.
- Mamillan, M, Bouineau, A. 1983. "Recherche Sur Les Matériaux Isolés et Porteurs Pour Maisons Individuelles." *Centre de Recherches et l'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics*, P.
- Maximilien, S, J Péra, and M Chabannet. 1997. "Study of the Reactivity of Clinkers." *Cement and Concrete Research* 27(1): 63–73.
- Menadi, S., Benazzouk, A., Douzane, O., Merzoud, M., Habita, M. F., & Langlet, T. 2013. "Etude de La Faisabilité d'un Composite à Matrice Cimentaire Renforcé de Fibres de Jute." *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 27: 40–49.
- Merabti, S. 2005. "Matériaux Composites Isolants à Base Des Déchets de Liège." *Thèse de doctorat. Blida*.
- 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.

- Na, B., Wang, Z., Wang, H., & Lu, X. 2014. "WOOD-Cement Compatibility Review." *Wood Research* 59(5): 813–25.
- Natterer, J. 2004. "Construction En Bois: Matériau, Technologie et Dimensionnement." *PPUR presses polytechniques* 13.
- Neville..A.M. 2000. "Propriétés Du Béton." *Edition Eyrolles, Paris*.
- Odler, I., & Abdul-Maula, S. 1984. "Possibilities of Quantitative Determination of the AFt-(Ettringite) and AFm-(Monosulphate) Phases in Hydrated Cement Pastes." *Cement and Concrete Research* 13(3): 576.
- Ragoubi, Mohamed et al. 2010. "Impact of Corona Treated Hemp Fibres onto Mechanical Properties of Polypropylene Composites Made Thereof." *Industrial Crops and Products* 31(2): 344–49.
- Ramachandran, V. S., & Lowery, M. S. 1992. "Conduction Calorimetric Investigation of the Effect of Retarders on the Hydration of Portland Cement." *Thermochimica Acta* 195: 373–87.
- READING.T.J. 1985. "Deleterious Effects of Wood Forms on Concrete Surfaces.", „" *Concrete International*: Nov, 57-62.
- Rowell, Roger M., et al. 2005. "14 Chemical Modification of Wood. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, 2005, Vol. 381." 381.
- Sauvat, N., Sell, R., Mougél, E., & Zoulalian, A. 1999. "Study of Ordinary Portland Cement Hydration with Wood by Isothermal Calorimetry." *Holzforschung* 53(1): 104–8.
- Sedan, D. 2007. "Etude Des Interactions Physico-Chimiques Aux Interfaces Fibres de Chanvre/Ciment: Influence Sur Les Propriétés Mécaniques Du Composite." *Thèse de doctorat. Limoges*.
- Shahzad, Asim. 2011. "Effects of Fibre Surface Treatments on Mechanical Properties of Hemp Fibre Composites." *Composite Interfaces* 18(9): 737–54.
- Silva, D. A. D., Roman, H. R., & Gleize, P. J. P. 2002. "Evidences of Chemical Interaction between EVA and Hydrating Portland Cement." *Cement and Concrete Research* 32(9): 1383–90.
- Silva, D. W., Scatolino, M. V., Pereira, T. G. T., Vilela, A. P., Eugenio, T. M. C., Martins, M. A., ... & Mendes, L. M. 2020. "Influence of Thermal Treatment of Eucalyptus Fibers on the Physical-Mechanical Properties of Extruded Fiber-Cement Composites." *Materials Today: Proceedings* 31: S348-S352. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.764>.
- Sjostrom, E. 1993. *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. Gulf professional publishing.
- Taylor, H.F.W. 1990. "No High Temperature Chemistry, in: Cement Chemistry, Title." *Academic Press, New York*,: 28–32.
- Touloum, F., Younsi, A., Kaci, A., & Benchabane, A. 2016. "Formulation of a Composite of Date Palm Wood-Cement." *Journal of Applied Engineering Science & Technology* 2(2): 57–63.

- Wilding. 1984. "A Classification of Inorganic and Organic Admixtures by Conduction Calorimetry." *Cement and Concrete Research*, 14(2): 185–94.
- Yahiaoui Lamia. 2011. "Caractérisation d'un Composite à La Rupture à Base Des Fibres Végétales (Diss)."
- Zhang, L. 2010. "Effects of Saccharide Set Retarders on the Hydration of Ordinary Portland Cement and Pure Tricalcium Silicate." *Journal of the American Ceramic Society* 93(1): 279–87.
- Zhengtian, L Moslemi, A.A. 1986. "Effect of Western Larch Extractives on Cement Setting." *Forest Prod J* 36: 53-54.

Sommaire des annexes

Annexe A : L'anatomie du bois

Annexe B : Théorie de conductimétrie

Annexe C : mesure de la densité (masse volumique)

Annexe D : Résultats de caractérisation du bois

Annexe A : L'anatomie du bois

Structure du bois :

L'observation du bois à l'œil ou à la loupe fait apparaître sa macrostructure ou sa microstructure.

Observation macroscopique

Nous pouvons étudier la macrostructure du bois en faisant des coupes orientées différemment par rapport à l'axe du tronc, comme l'indique la figure (61).

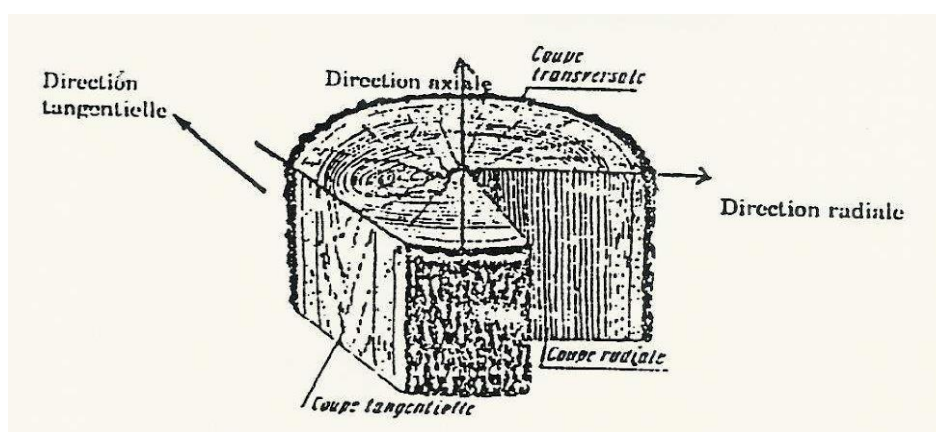


Figure 59: coupe du bois (Fotsing, J. A. M., & Fokoua. 2012)

L'anisotropie du bois fait que ces propriétés varient avec la coupe. Par conséquent, l'étude des propriétés du bois doit être faite sur les trois principales coupes :

- Coupe transversal ou normale a la tige.
- Coupe radiale le long de l'axe.
- Coupe tangentielle le long de l'axe.

Parailleurs, une coupe transversale (figure 62) d'un tronc d'arbre nous montre de l'intérieur vers l'extérieur :

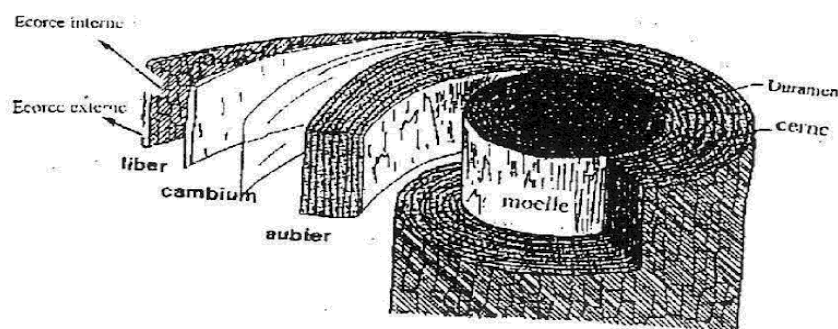


Figure 60: Coupe transversale d'un tronc d'arbre (Fotsing, J. A. M., & Fokoua 2012)

L'écorce : se réfère à tous les tissus en dehors du cambium vasculaire. Il recouvre le bois et se compose de l'écorce interne et de l'écorce externe. L'écorce interne des vieilles tiges est un tissu vivant. Il comprend la région la plus interne du périderme.

L'écorce interne stocke les nutriments et les transporte à travers l'arbre. L'écorce externe des vieilles tiges comprend le tissu mort à la surface des tiges, ainsi que des parties du périderme le plus interne et tous les tissus situés à l'extérieur du périderme.

L'écorce externe des arbres situés à l'extérieur du dernier périderme formé est également appelée rhytidome. Les fonctions principales de l'écorce sont la protection contre les blessures ou les maladies et la conduction des nutriments. L'épaisseur et l'aspect de l'écorce varient considérablement en fonction de l'espèce et de l'âge de l'arbre. Juste à l'intérieur de cette couche se trouve une très mince couche invisible, le cambium. Il produit une nouvelle croissance dans la circonférence de l'arbre. Il produit l'écorce interne à l'extérieur.

Le cambium : est une partie vitale de l'arbre puisqu'il correspond à la zone où a lieu la production des couches de tissus cellulaires, il y a une production de bois sur sa face interne et de liber (transformé par la suite en écorce) sur sa face externe. Le rôle de cambium conduit et stocke les nutriments et fournit à l'arbre un support structurel. Au centre du bois, où commence la croissance des arbres, se trouve le centre de la moelle ou du cœur.

L'aubier : L'aubier se compose de cellules actives et inactives. Il se trouve à l'extérieur de l'arbre, à côté du cambium. Il fonctionne principalement dans le stockage des aliments et le transport de la sève des racines aux feuilles où il est transformé en nutriments. Fait partie des tissus vivants de l'arbre, c'est dans cette zone que circule de manière ascendante la sève brute.

Ce bois est situé en périphérique de l'arbre, les parois cellulaires se transforment et les tissus meurent c'est Alor du bois parfait au bois de cœur.

Le bois de cœur : est la couche inactive située sous l'aubier. Il est souvent plus foncé que l'aubier, bien que pour de nombreuses espèces, il n'y ait pas beaucoup de différence de couleur. Il est composé principalement de cellules inactives qui diffèrent physiquement et chimiquement des cellules d'aubier, Dans la plupart des espèces, le bois de cœur contient des substances extractives qui se déposent dans la cellule lors de la conversion de l'aubier en bois de cœur. Ces dépôts donnent souvent au bois de cœur une couleur beaucoup plus sombre que l'aubier Si le bois du cœur et facilement identifiable de l'aubier alors il est appelé duramen comme par exemple pour le chêne ou le sapin de douglas.

L'échelle microscopique :

L'étude de la structure de bois en utilisant un microscope laisse découvrir plusieurs éléments parmi lesquelles :

- Les couches.
- Les parois cellulaires.
- Les cellules.
- Les pores.

Le plan ligneux :

Les cellules :

Le bois est un ensemble de tissu d'origine secondaire, constitué de différents types de cellules (trachéide, parenchyme, élément de vaisseaux), certaine de ces cellules sont présentes chez toutes les espèces (trachéide), Alor que d'autre sont spécifique à une famille (élément de vaisseaux)

La microstructure du bois est observée par microscopie à balayage. On peut distinguer deux microstructures :

La microstructure des résineux est très simplifiée. Toute la masse du bois est constituée d'un seul type de cellules qui constituent à la fois le tissu de soutien (donnant la résistance au bois), et le tissu de conduction (conduisant l'eau et les substances nutritives). On ne note pas de différenciation de taille entre les cellules de structure et les vaisseaux d'irrigation.

La microstructure des feuillus est beaucoup plus Complexe que celle des résineux. Ici on distingue nettement deux classes de cellules (Boustingorry.2002), (Figure 63) :

- Des cellules de grand diamètre : notées « V » sur le cliché, il s'agit de vaisseaux, dont le rôle est de véhiculer la sève.
- Des cellules de petit diamètre : il s'agit de cellules de structure.
- Des cellules perpendiculaires à ces dernières (orientées selon le rayon du tronc) : notées « R » sur le cliché, il s'agit des parenchymes, qui contiennent les nutriments nécessaires à la vie.
- Ces cellules communiquent par l'intermédiaire de ponctuations comme nous le montre la Figure (63.b).

Chez les résineux, de structure plus simple, les mêmes cellules, les trachéide longitudinales orientées verticalement, et qui représentent 90% des cellules remplissent les deux fonctions, la fonction de la conduction de la sève et la fonction du soutien mécanique.

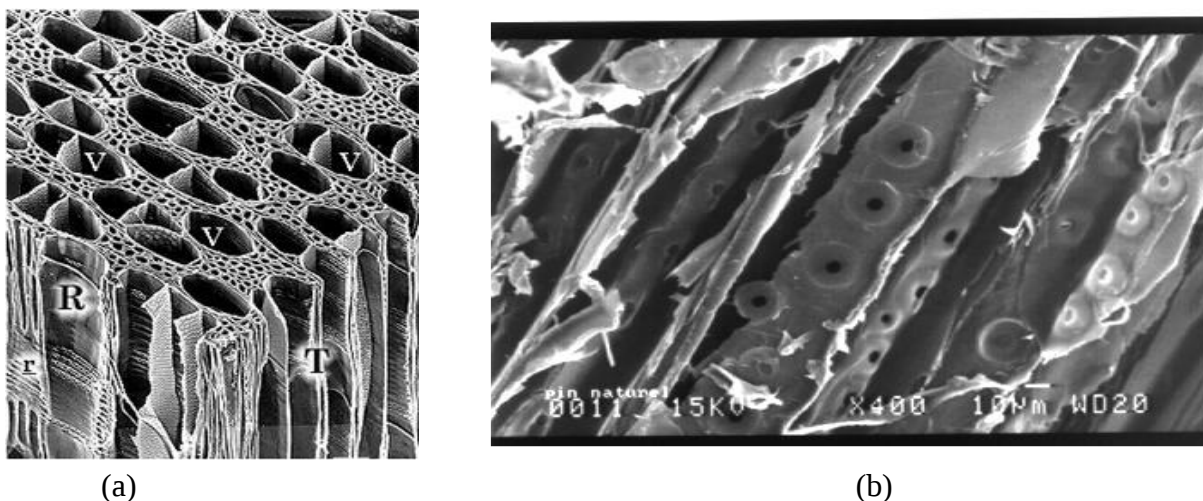


Figure 61: Microstructure du bois : (a) structure cellulaire, (b) ponctuations (Boustingorry.P 2002)

Au début du printemps, la sève recommence à circuler dans les anneaux de l'arbre. L'arbre a besoin de beaucoup de sève au démarrage de la végétation. Le cambium se met à fabriquer du bois contenant des gros anneaux. Ce bois est clair et on l'appelle le « bois de printemps » (mars à juin).

Plus tard, à la fin de l'été et en automne, les besoins en eau sont moins importants. Le cambium fabrique alors du bois avec des anneaux plus étroits. Ce bois est plus serré de couleur

foncée. On l'appelle « **bois d'été** ». La figure 64 montre d'accroissement annuel au niveau des cellules du bois d'été et de printemps.

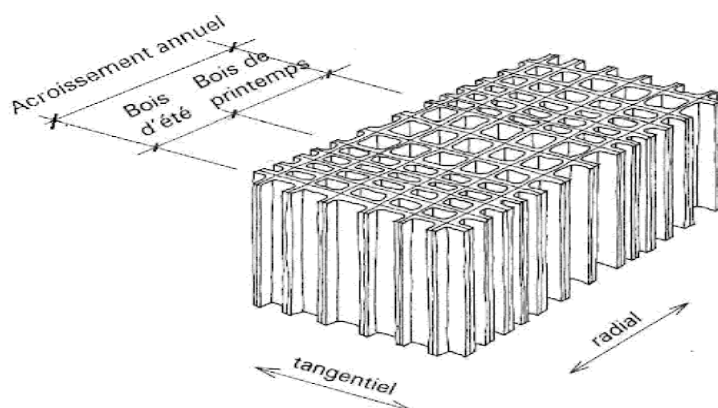


Figure 62:schéma d'accroissement annuel au niveau des cellules

La paroi cellulaire :

Après la mort des cellules ; il ne reste que les parois cellulaires qui constituent le matériau bois ; la représentation schématique des différentes couches constituant la paroi cellulaire est donnée à la figure (65).

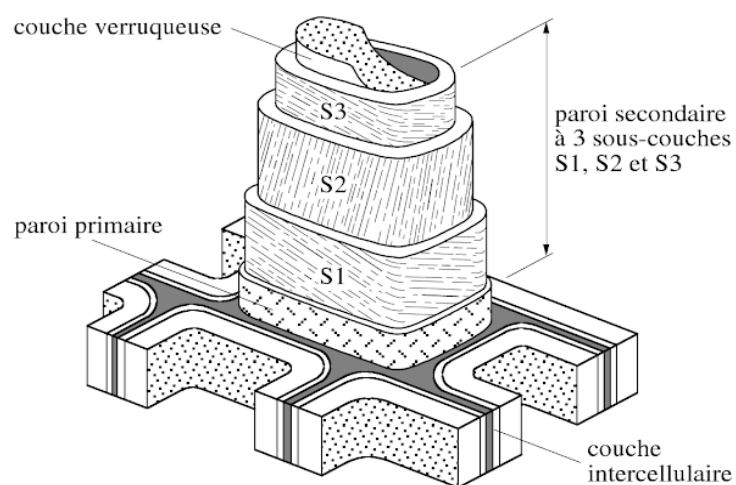


Figure 63:Représentation schématique des différentes couches et structure de la paroi cellulaire(Natterer 2004)

Chaque cellule est soudée à ses voisines par la lamelle mitoyenne, sort de ciment constitué de lignine de substances pectiques et d'hémicellulose, ce qui permet la cohésion des tissus, cette membrane, d'épaisseur comprise entre 0.5 et 1.5um, est recouverte par des membrane primaire, sorte de graine formée de fibrilles de cellulose enchevêtrées sans orientation spéciale, associées à un pourcentage élevé de lignine et d'hémicellulose.

En trouve ensuite la membrane secondaire, formée de trois sous couches S1, S2, S3 qui diffèrent par leur épaisseur et l'orientation des micro fibrilles qui les constituent, l'épaisseur totale peut aller de 4 à 10 um (Natterer 2004).

Annexe B : Théorie de conductimétrie.

Conductimétrie :

La conductance électrique est la capacité d'un corps soumis à une différence de potentiel, à conduire le courant électrique. Le processus d'hydratation du ciment entraîne une évolution de la concentration ionique ce qui entraîne une variation de la conductance électrique G de la solution. La conductance d'un objet est directement proportionnelle à sa surface S et inversement proportionnelle à sa longueur l :

$$G = \lambda \cdot \frac{S}{l}$$

- G : conductance en siemens (S)
- λ : Conductivité (S.cm-1)
- S : surface (cm²)
- l : longueur (cm)

La conductivité λ d'une solution donnée dépend de la concentration de ses ions, de leur mobilité et de la température. Suivant la loi de Kohlrausch, en solution diluée, la conductivité est la somme des conductivités individuelles de chaque ion multipliées par leur concentration.

$$\lambda = \frac{\sum \lambda_i^0 \cdot C_i}{1000}$$

λ : conductivité mesurée (S.cm-1)

λ_i^0 : conductivité ionique équivalente (Scm²/équivalent)

C_i : concentration de l'ion i (équivalent/L)

Anions	λ_i^0	Cations	λ_i^0
OH^-	198	H^+	350
Cl^-	76	Na^+	50
SO_4^{2-}	80	K^+	74
CH_3COO^-	41	Ca^{2+}	60
HCOO^-	55		

Tableau 12 : Valeurs des conductivités équivalentes de quelques ions à 25°C (S cm^2 /équivalent)

Annexe C : Mesure de la densité

Le matériel :

- Une balance en décigramme
- voluménomètre
- Liquide inerte (toluène)

Mode opératoire :

- Remplir l'appareil par le liquide inerte, jusqu'à ce que le niveau parvienne entre 0 et 1, éviter de mouiller les parois lors du remplissage.
- Immerger le voluménomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20 °C ±1.
- Repérer le niveau N_0 .
- Peser une masse de l'échantillon.
- Verser l'échantillon très lentement et déplacer le voluménomètre de récipient et le poser sur la table.
- Boucher le voluménomètre, l'incliner et faire rouler avec un mouvement de va et vient de manière à faciliter le départ de l'air.
- Déplacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_1 .

$$\rho = \frac{m}{N_1 - N_0} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

m : la masse de l'échantillon (bois, ciment).

N_0 : volume initiale

N_1 : volume finale.

	La Densité (g/cm ³)
Ciment	3.21
Bois	1.16

Tableau 13: résultats de la densité de bois et du ciment

Annexe D : résultats de caractérisation de bois

	%	
Composition de la matière organique	Les extractibles (cire, graisse)	10
	Pectine	9.13
	Hémicellulose	16.12
	Cellulose	46.65
	Lignine	18.10

Tableau 14: Résultats de caractérisation de bois d'eucalyptus.

Liste des publications

Communication :

- Journées scientifiques sur l'impact des constructions sur l'environnement à l'université de Jijel sur « Etude de l'influence de la poudre de bois d'eucalyptus *camaldulensis* Dehn sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers ».
- Conférence nationale sur la chimie des matériaux à l'université de Boumerdes sur « adsorption d'un colorant jaune bezaktiv par les cupules ». Juillet 2019
- Conférence Nationale sur la Mécanique & Maintenance à l'université de Boumerdes sur « Influence des traitements du bois d'Eucalyptus sur l'hydratation et les performances mécaniques des composites bois-ciment ».

Publication internationale :

Article intitulé : “ Étude de l'influence de l'incorporation de la poudre de bois d'*Eucalyptus* *Camaldulensis* Dehn algérien sur la cinétique d'hydratation du coulis de ciment “ « Matériaux et technique » France.