

Table des matières

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Listes des figures	x
Listes des tableaux.....	xvi
Introduction	20
Contexte	20
Sujet traité dans cette étude	20
Présentation du manuscrit	21
Chapitre I. Contexte et état de l'art.....	24
1. Introduction	24
2. Le secteur de la construction, les enjeux du développement durable et les éco-matériaux.....	24
2.1. Problématique environnementale et engagements internationaux	24
2.2. Les impacts environnementaux du secteur du bâtiment.....	25
2.3. Substitution des matériaux de construction actuels par des éco-matériaux.....	25
3. Les fibres : un renfort dans les composites.....	29
3.1. Les fibres naturelles.....	29
3.2. Les fibres de lin	34
3.3. Les fibres de chanvre.....	37
4. Caractéristiques des composites cimentaires incorporant des fibres polypropylènes et végétales	39
4.1. Composite cimentaire incorporant des fibres synthétiques	40
4.2. Les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales	46
4.3. Durabilité des composites cimentaires renforcés par des fibres végétales	55
5. Conclusion et stratégie pour le travail de thèse	60
5.1. Conclusion bibliographique.....	60
5.2. Démarche du travail de thèse	60
Chapitre II. Matériaux et méthodes de caractérisation	64
1. Introduction	64
2. Les fibres employées	64
2.1. Les fibres polypropylènes.....	64
2.2. Les fibres végétales	65
3. Caractérisation des fibres végétales.....	67
3.1. Etude granulométrique	67

3.2.	Prétraitement des fibres de lin par humidification/séchage	69
3.3.	Composition chimique.....	70
3.4.	Morphologie des fibres.....	71
3.5.	Cinétique d'absorption d'eau et taux de saturation en eau	72
3.6.	Résistance en traction	74
4.	Le mortier	76
4.1.	Constituants des matrices minérales.....	76
4.2.	Caractérisation des mortiers	78
5.	Conclusion.....	83
Chapitre III. Formulations et caractérisation des mortiers à l'état frais		84
1.	Introduction	86
2.	Choix des formulations	86
2.1.	Formulations de référence	87
2.2.	Formulations fibrées.....	87
3.	Hydratation des mortiers	92
3.1.	Résumé bibliographique sur la réaction d'hydratation cimentaire et la réaction pouzzolanique.....	92
3.2.	Temps de prise.....	93
3.3.	Chaleur d'hydratation.....	96
4.	Retrait plastique.....	99
4.1.	Résumé bibliographique sur le retrait du matériau au jeune âge.....	99
4.2.	Dispositif expérimental	101
4.3.	Résultats et discussions	102
5.	Conclusion.....	106
Chapitre IV. Effet du renfort par des fibres végétales sur la sensibilité à la fissuration des mortiers au jeune âge		108
1.	Introduction	108
2.	Résumé bibliographique.....	108
2.1.	Présentation du phénomène du retrait empêché	108
2.2.	Méthodes de caractérisation du retrait empêché.....	108
3.	Essais développés	112
3.1.	Dispositif de mise en conditions sévères	112
3.2.	Essais sur moules prismatiques	114
3.3.	Essai sur support adhérent en brique	119
4.	Essai complémentaire : la perte de masse	125
5.	Conclusion.....	126
Chapitre V. Comportement des mortiers à l'état durci		128
1.	Introduction	128

2. Evaluation de la résistance à l'impact des mortiers.....	128
2.1. Résumé bibliographique.....	128
2.2. Dispositif expérimental	130
2.3. Résultats et discussions	133
3. Comportement mécanique des mortiers	139
3.1. Résistance en compression	139
3.2. Comportement à la flexion	141
4. Porosité accessible à l'eau	144
5. Caractérisation microstructurale de l'interface fibres/matrice	146
6. Comportement des mortiers face à des hautes températures	149
6.1. Résumé bibliographique.....	149
6.2. Dispositif expérimental	150
6.3. Résultats obtenus	151
7. Conclusion.....	157
Conclusion générale et perspectives.....	158
Listes des références.....	166

Listes des figures

FIGURE I-1: DISTRIBUTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EN FONCTION DE LA PERFORMANCE D'UN BATIMENT (LANIER ET AL., 2008)	26
FIGURE I-2: QUELQUES ELEMENTS VEGETAUX DANS LA CONSTRUCTION.....	28
FIGURE I-3 : DIFFERENTES FORMES DE FIBRES VEGETALES (JÖRG MÜSSIG, 1999) CITE PAR (CHAFEI, 2014; PAGE, 2017A)	30
FIGURE I-4: STRUCTURE MOLECULAIRE DE CELLULOSE (ROUDIER, 2012)	31
FIGURE I-5 : LA CINETIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES FIBRES DE LIN, CHANVRE ET YUCCA (MAGNIONT, 2010A) .	33
FIGURE I-6 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN TRACTION DE FIBRES DE PALMIER EN FONCTION DE LA LONGUEUR (KRIKER ET AL., 2005)	34
FIGURE I-7: EVOLUTION DE LA RESISTANCE EN TRACTION DE FIBRES DE LIN EN FONCTION DE LA LONGUEUR (BLEDZKI, 1999)	34
FIGURE I-8: COUPE TRANSVERSALE DE LA TIGE DE LIN (A) ; FORME POLYGONALE DE LA FIBRE DE LIN (B)	35
FIGURE I-9: STRUCTURE DE BASE DE LA FIBRE DE LIN (BALEY, 2002)	36
FIGURE I-10: STRUCTURE DE LA FIBRE DE LIN AU SEIN D'UN FAISCEAU (BALEY, 2002).....	36
FIGURE I-11: TIGES DE LIN ROUIES AU CHAMP (CHARLET, 2008).....	36
FIGURE I-12: TEILLAGE DE LIN	36
FIGURE I-13: PEIGNAGE DE LIN WWW.EMBRIN.FR	36
FIGURE I-14 : DEBOUCHES DES FIBRES COURTES DE LIN (LUMINGKEWAS, 2015)	37
FIGURE I-15: COUPE TRANSVERSALE D'UNE FIBRE DE CHANVRE	38
FIGURE I-16: ANALYSE MICROSCOPIQUE D'UNE LA FIBRE DE CHANVRE	38
FIGURE I-17: LA RECOLTE DU CHANVRE	39
FIGURE I-18: LE ROUISSAGE DU CHANVRE.....	39
FIGURE I-19: LES DIFFERENTS COMPOSANTS DE LA PLANTE DU CHANVRE (%) (VIGNON, 2014).....	39
FIGURE I-20: LES FIBRES POLYPROPYLENES	40
FIGURE I-21: MOTIF A LA BASE DU POLYPROPYLENE.....	40
FIGURE I-22: INFLUENCE DES FIBRES SUR L'EVOLUTION DU RETRAIT PLASTIQUE (MESSAN, 2006)	42
FIGURE I-23: COMPARAISON DE LA FISSURATION DUE AU RETRAIT PLASTIQUE ENTRE UNE FORMULATION CIMENTAIRE NON FIBREE ET DES FORMULATIONS RENFORCEES PAR PLUSIEURS DOSAGES EN FIBRES DE POLYPROPYLENE (SADIQUL ISLAM AND GUPTA, 2016).....	42
FIGURE I-24: RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU DOSAGE EN FIBRES POLYPROPYLENES DE 9 MM DE LONGUEUR (VINAY KUMAR SINGH, 2014)	43
FIGURE I-25: RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON EN FONCTION DE LA LONGUEUR DES FIBRES (NAJIMI ET AL., 2009)	44
FIGURE I-26: COMPORTEMENT EN FLEXION D'UN BETON DE REFERENCE (A) ET D'UN BETON RENFORCE PAR 0,5% DE FIBRES DE POLYPROPYLENE (OROUJI ET AL., 2021).....	44
FIGURE I-27: CAPACITE PORTANTE MAXIMALE EN FLEXION EN FONCTION DU DOSAGE DE FIBRES DE POLYPROPYLENE (OROUJI ET AL., 2021)	45
FIGURE I-28: EFFET DE LA LONGUEUR ET DU DOSAGE EN FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA FLEXION DU BETON (AKHMETOV ET AL., 2022).....	45

FIGURE I-29 : VARIATION DU TEMPS D'ÉCOULEMENT EN FONCTION DU DOSAGE EN FIBRES (LE HOANG, 2013)....	47
FIGURE I-30: ÉVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CALCIUM, SILICIUM, ALUMINIUM ET FER DANS LA PÂTE DE CIMENT FIBRÉE (SEDAN, 2007).....	48
FIGURE I-31: PRINCIPE DU RETRAIT EMPÊCHÉ (WWW.CPTECHCENTER.ORG).....	49
FIGURE I-32: RETRAIT AU JEUNE ÂGE DU COMPOSITE CIMENTAIRE AVEC FIBRES DE CELLULOSES (0,5 ; 1 ET 2% EN MASSE DE LIANT, UF : UNTRAITED FIBERS) (BOOYA ET AL., 2019)	50
FIGURE I-33: EXEMPLE DE FISSURATION POUR DIFFÉRENTES FRACTIONS VOLUMIQUES ET LONGUEURS DE FIBRES DE LIN (JUAREZ ET AL., 2015)	51
FIGURE I-34: COMPORTEMENT EN FLEXION TROIS POINTS DU MORTIER CIMENTAIRE NON FIBRE, MT, ET CELUI D'UN MORTIER RENFORCÉ PAR UN TAUX VOLUMIQUE DE 2% DE FIBRES DE LIN, MFT (CHAFEI, 2014)	52
FIGURE I-35: COURBES FORCE – DÉPLACEMENT EN FLEXION 3 POINTS (RUANO ET AL., 2020)	52
FIGURE I-36: EFFET DU DOSAGE EN FIBRE DE LIN ET DE LA LONGUEUR DE LA FIBRE SUR LA CONTRAINTE EN FONCTION DE LA DÉFORMATION EN TRACTION PAR FLEXION (LE HOANG, 2013)	53
FIGURE I-37: RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES COMPOSITES EN FONCTION DE (A) LA LONGUEUR DE FIBRES ET DE (B) LA TENEUR EN FIBRES (LE HOANG, 2013).....	53
FIGURE I-38: RÉSISTANCE RÉSIDUELLE À L'IMPACT SUR DES COMPOSITES RENFORCÉS PAR DES FIBRES DE JUTE ET DE SISAL (RAMAKRISHNA AND THIRUMALAI, 2005A)	55
FIGURE I-39: COMPORTEMENT MÉCANIQUE EN FLEXION 3 POINTS D'UNE MATRICE CIMENTAIRE RENFORCÉE PAR DES FIBRES DE CHANVRE BRUTES (FIB), ET DES FIBRES TRAITÉES AVEC UNE SOLUTION DE SOUDE (FIBNA) ET DE CHLORURE D'ALUMINIUM (FIBAL) À 28 JOURS (A) ET APRÈS 12 MOIS DE VIEILLISSEMENT NATUREL (B) 56	
FIGURE I-40: EFFET DES CYCLES DE VIEILLISSEMENT SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE EN FLEXION 3 POINTS DE CIMENT RENFORCÉ PAR DES FIBRES DE CONIFÈRES (MOHR ET AL., 2005).....	56
FIGURE I-41: RÉSISTANCE À LA TRACTION DES FIBRES DE SISAL ET DE COCO EN FONCTION DE LA DURÉE D'IMMERSION DANS DES SOLUTIONS BASIQUES ET DANS L'EAU (TOLEDO FILHO ET AL., 2000).....	56
FIGURE I-42: PHÉNOMÈNE DE DÉCHAUSSEMENT DES FIBRES DE LIN AU SEIN D'UNE MATRICE CIMENTAIRE (LE HOANG, 2013).....	57
FIGURE I-43 : COMPORTEMENT MÉCANIQUE EN FLEXION DE COMPOSITES À MATRICE CIMENTAIRE	59
FIGURE I-44: COMPORTEMENT EN FLEXION DE COMPOSITES À MATRICE POZZOLANIQUE SANS HYDROXYDE DE CALCIUM AU JEUNE ÂGE ET APRÈS DES CYCLES DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ	59
FIGURE II-1: LES FIBRES POLYPROPYLENES.....	65
FIGURE II-2: LES FIBRES DE LIN	66
FIGURE II-3: FILASSE DE CHANVRE.....	67
FIGURE II-4: FIBRES COUPÉES.....	67
FIGURE II-5: LE PROTOCOLE DE MESURE DE LA LONGUEUR DES FIBRES	68
FIGURE II-6: DISTRIBUTION DE LA LONGUEUR DES FIBRES DE LIN	68
FIGURE II-7: MÉTHODE DE PRÉTRAITEMENT TESTÉE SUR LES FIBRES DE LIN	69
FIGURE II-8: LE PRINCIPE DE LA MÉTHODE VAN SOEST ET WINE	70
FIGURE II-9: ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES FIBRES AVEC DEUX GROSSISSEMENTS	72
FIGURE II-10: IMMERSION DES FIBRES DANS L'EAU.....	73
FIGURE II-11: LES FIBRES APRÈS SÈCHAGE SUPERFICIEL	73
FIGURE II-12: LE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DES FIBRES APRÈS 24 H D'IMMERSION	73
FIGURE II-13: LA CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES FIBRES	74

FIGURE II-14: LE PROTOCOLE DE LA MESURE DE LA RESISTANCE EN TRACTION DES FIBRES.....	75
FIGURE II-15: CONTRAINTE EN FONCTION DE LA DEFORMATION EN TRACTION DIRECTE - CAS D'UNE FIBRE DE LIN	75
FIGURE II-16: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA CHAMBRE DE CALCINATION (NICOLAS, 2011)	77
FIGURE II-17: LES ETAPES DU MALAXAGE DU MORTIER	79
FIGURE II-18: ESSAI AU MANIABILIMETRE.....	80
FIGURE II-19: ESSAI A LA TABLE A SECOUSSES.....	80
FIGURE II-20: MACERATION DES FIBRES	80
FIGURE II-21: SOLUTION DES ELUATS DES FIBRES	80
FIGURE II-22: ESSAI DE FLEXION	81
FIGURE II-23: ESSAI DE COMPRESSION.....	82
FIGURE II-24: ECHANTILLONS DANS LE DESSICCATEUR	83
FIGURE II-25: SYSTEME DE PESEE HYDROSTATIQUE	83
FIGURE III-1 : LE TEMPS D'ÉCOULEMENT DES FORMULATIONS CIMENTAIRES SANS SUPERPLASTIFIANT (SANS SP) ET AVEC SUPERPLASTIFIANT (AVEC SP).....	89
FIGURE III-2 : LE DIAMETRE D'ÉTALEMENT DES FORMULATIONS CIMENTAIRES SANS SUPERPLASTIFIANT (SANS SP) ET AVEC SUPERPLASTIFIANT (AVEC SP).....	89
FIGURE III-3 : LE TEMPS D'ÉCOULEMENT DES FORMULATIONS POZZOLANQUES SANS SUPERPLASTIFIANT (SANS SP) ET AVEC SUPERPLASTIFIANT (AVEC SP)	90
FIGURE III-4 : LE DIAMETRE D'ÉTALEMENT DES FORMULATIONS CIMENTAIRES SANS SUPERPLASTIFIANT (SANS SP) ET AVEC SUPERPLASTIFIANT (AVEC SP).....	90
FIGURE III-5: TEMPS DE DEBUT DE PRISE (ESSAI VICAT) SUR LES PATES CIMENTAIRES	93
FIGURE III-6: TEMPS DE DEBUT DE PRISE MESURES (ESSAI VICAT) SUR LES PATES POZZOLANQUES	94
FIGURE III-7: COMPARAISON ENTRE LA MESURE DU TEMPS DE DEBUT DE LA PRISE DES PATES CIMENTAIRES LES FIBRES ET L'EAU CONTENANT LES ELUATS DES FIBRES.....	95
FIGURE III-8 : COMPARAISON ENTRE LA MESURE DU TEMPS DE DEBUT DE LA PRISE DES PATES POZZOLANQUES AVEC LES FIBRES ET L'EAU CONTENANT LES ELUATS DES FIBRES.	96
FIGURE III-9: FLUX DE CHALEUR PAR CALORIMETRIE ISOTHERME DE LA PATE CIMENTAIRE TEMOIN (EAU CLAIRE) ET DES PATES AVEC LA SOLUTION CONTENANT LES ELUATS DES FIBRES	97
FIGURE III-10: FLUX DE CHALEUR PAR CALORIMETRIE ISOTHERME DE LA PATE POZZOLANQUES TEMOIN (EAU CLAIRE) ET DES PATES AVEC DE SOLUTION CONTENANT LES ELUATS DES FIBRES	98
FIGURE III-11: LA CHALEUR TOTALE DEGAGEE POUR LES PATES CIMENTAIRES ET LE POURCENTAGE DE REDUCTION PAR RAPPORT AU CNF.....	98
FIGURE III-12: LA CHALEUR TOTALE DEGAGEE POUR LES PATES POZZOLANIQUE ET LE POURCENTAGE DE REDUCTION PAR RAPPORT AU PNF	99
FIGURE III-13: DISPOSITIF DE MESURE DES DEFORMATIONS PLASTIQUES (TURCRY, 2004).....	100
FIGURE III-14: DISPOSITIF DE MESURE DES DEFORMATIONS PLASTIQUES : MOULE 7x7x28 CM (A), ENVELOPPE (B+C), CAPTEURS LASER (D ET E) (TURCRY, 2004).....	100
FIGURE III-15: DISPOSITIF POUR QUANTIFIER LE RETRAIT PLASTIQUE REALISEE PAR (MBEMBA-KIELE, 2010) ...	100
FIGURE III-16: DISPOSITIF DU RETRAIT PLASTIQUE ADOPTEE PAR (KOUTA ET AL., 2020).....	100
FIGURE III-17: LE MOULE PRISMATIQUE FABRIQUE POUR MESURER LE RETRAIT PLASTIQUE	101

FIGURE III-18: LES DIFFERENTS ELEMENTS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR LA MESURE DU DEPLACEMENT LIE AU RETRAIT PLASTIQUE	102
FIGURE III-19: PRINCIPE DE MESURE DU DEPLACEMENT LIE AU RETRAIT PLASTIQUE	102
FIGURE III-20: EVOLUTION TYPIQUE DU RETRAIT PLASTIQUE POUR UN MORTIER.....	103
FIGURE III-21: PRINCIPE DE LA DETERMINATION DE LA VITESSE DU RETRAIT ET DE LA VALEUR FINALE	103
FIGURE III-22 : EVOLUTION DU RETRAIT PLASTIQUE DES MORTIERS (TEMOINS ET FIBRES) EN FONCTION DU TEMPS	105
FIGURE IV-1: GEOMETRIE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL DU RING TEST SELON LA NORME ASTM C1581 –2004, A=13 MM, B=330 MM, C=406 MM ET H=130 MM. CETTE PHOTO EST RECUPEREE DE LA THESE DE (HO, 2010)	109
FIGURE IV-2: LES CARACTERISTIQUES DU MOULE PRISMATIQUE ET DES SURELEVATIONS METALLIQUES SELON LA NORME (ASTM C1579, 2006).....	109
FIGURE IV-3: EXEMPLE DE MAILLAGE DE FISSURATION SUR SUPPORT ADHERENT (JUAREZ ET AL., 2015).....	110
FIGURE IV-4: SUPPORT BETON AVEC PROTUBERANCES SPHERIQUES (BRANSTON ET AL., 2016).....	111
FIGURE IV-5: SUPPORT EN BETON RIGIDE (BERTELSEN ET AL., 2019A)	111
FIGURE IV-6: SUPPORT AVEC DES GRANULATS (JUAREZ ET AL., 2015).....	111
FIGURE IV-7: EXEMPLE D’ESSAIS AVEC DES TIGES LOCALISES AU BORD ET AU FOND DES MOULES (CHOI ET AL., 2014; RUIZ-RIPOLL ET AL., 2013)	112
FIGURE IV-8: LE TUNNEL VENTILE UTILISE POUR TESTER LA SENSIBILITE A LA FISSURATION AU JEUNE AGE	113
FIGURE IV-9 : CONFIGURATION DU TUNNEL VENTILE POUR PRODUIRE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SEVERES.....	114
FIGURE IV-10 : GEOMETRIE DU MOULE FABRIQUE, (A) LES DIMENSIONS DES SURELEVATIONS TRIANGULAIRES, (B) VUE DE DESSUS DU MOULE.	114
FIGURE IV-11: PROCEDURE DE MESURE DE L’OUVERTURE DE LA FISSURE (ESSAI SUR MOULE AVEC SURELEVATION)	115
FIGURE IV-12: LE CRR1 DES FORMULATIONS POZZOLANQUES FIBREES (ESSAIS SUR MOULES AVEC SURELEVATIONS)	117
FIGURE IV-13: LE CRR1 DES FORMULATIONS CIMENTAIRES FIBREES (ESSAIS SUR MOULES AVEC SURELEVATIONS)	117
FIGURE IV-14: DIMENSIONS DE LA BRIQUE ET DU RECHARGEMENT EN MORTIER	119
FIGURE IV-15: ILLUSTRATION D’UN ECHANTILLON DE MORTIER SUR LA BRIQUE	119
FIGURE IV-16: LES ETAPES DE L’ANALYSE D’IMAGES POUR CARACTERISER LA FISSURATION DU MORTIER	120
FIGURE IV-17: LE CRR2 DES FORMULATIONS POZZOLANQUES.....	122
FIGURE IV-18: COMPARAISON DU CRR2 DES FORMULATIONS POZZOLANQUES AVEC UNE LONGUEUR DE FIBRES DE 6 ET 12 MM.....	123
FIGURE IV-19: LA PERTE EN MASSE DES FORMULATIONS POZZOLANQUES ET CIMENTAIRES PENDANT LES 6 PREMIERES HEURES (EN CONDITIONS SEVERES).....	125
FIGURE V-1: COMPORTEMENT DU MATERIAU SOUS L’ACTION D’UNE FORCE EXTERIEURE (ASMARO, 2013)	128
FIGURE V-2: BANC EXPERIMENTAL POUR L’ESSAI A L’IMPACT.....	130
FIGURE V-3: PRINCIPE PHYSIQUE DE LA TRANSMISSION DES ONDES ULTRASONORES ET RELATION A LA RIGIDITE DU MATERIAU	131
FIGURE V-4: PRINCIPE DE MESURE DE LA VITESSE DE LA PROPAGATION DES ONDES ULTRASONORES	132

FIGURE V-5: EXEMPLE DE VARIATION DE LA VITESSE DE TRANSMISSION DES ONDES ULTRASONORES EN FONCTION DE L'ENERGIE CUMULEE D'IMPACT POUR UN MORTIER NON FIBRE ET FIBRE.....	132
FIGURE V-6: LA PREMIERE FISSURE.....	133
FIGURE V-7: LA RUPTURE DU MATERIAU.....	133
FIGURE V-8: LA VARIATION DE LA VITESSE DE TRANSMISSION DES ONDES ULTRASONORES EN FONCTION DE L'ENERGIE CUMULEE D'IMPACT POUR LES FORMULATIONS CIMENTAIRES.....	134
FIGURE V-9: LA VARIATION DE LA VITESSE DE TRANSMISSION DES ONDES ULTRASONORES EN FONCTION DE L'ENERGIE CUMULEE D'IMPACT POUR LES FORMULATIONS POUZZOLANQUES.....	134
FIGURE V-10: ENERGIE CUMULEE D'IMPACT POUR LES FORMULATIONS CIMENTAIRES	135
FIGURE V-11: ENERGIE CUMULEE D'IMPACT POUR LES FORMULATIONS POUZZOLANQUES	135
FIGURE V-12: ENERGIE CUMULEE A LA RUPTURE, ESSAI A L'IMPACT POUR LES FORMULATIONS POUZZOLANQUES A 28 ET 180 JOURS.....	137
FIGURE V-13: EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES MORTIERS CIMENTAIRES EN FONCTION DU TEMPS	139
FIGURE V-14: EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES MORTIERS POUZZOLANQUES EN FONCTION DU TEMPS	139
FIGURE V-15 : RESISTANCE A LA COMPRESSION POUR LES FORMULATIONS CIMENTAIRES A 28 ET 180 JOURS	141
FIGURE V-16: RESISTANCE A LA COMPRESSION POUR LES FORMULATIONS POUZZOLANQUES A 28 ET 180 JOURS	141
FIGURE V-17: COURBES FORCE-FLECHE EN FLEXION 3 POINTS DES DIFFERENTS MORTIERS CIMENTAIRES ET POUZZOLANQUES A 1, 7, 28 ET 180 JOURS	142
FIGURE V-18: POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU DES FORMULATIONS CIMENTAIRES.....	144
FIGURE V-19: POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU DES FORMULATIONS POUZZOLANQUES.....	144
FIGURE V-20: RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA POROSITE DU MORTIER CIMENTAIRE	145
FIGURE V-21: RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA POROSITE DU MORTIER POUZZOLANIQUE...	146
FIGURE V-22: ANALYSE MEB DU MORTIER CIMENTAIRE A 28 JOURS AVEC PLUSIEURS GROSSISSEMENTS	147
FIGURE V-23: ANALYSE MEB DU MORTIER POUZZOLANIQUE A 28 JOURS AVEC PLUSIEURS GROSSISSEMENTS ...	148
FIGURE V-24: ANALYSE MEB DU MORTIER CIMENTAIRE A 180 JOURS AVEC PLUSIEURS GROSSISSEMENTS	148
FIGURE V-25: ANALYSE MEB DU MORTIER POUZZOLANIQUE A 180 JOURS AVEC PLUSIEURS GROSSISSEMENTS .	149
FIGURE V-26: (A) FIBRE POLYPROPYLENE APRES LE CYCLE D'ECHAUFFEMENT JUSQU'A 180°C (GAWESKA, 2004) ; (B) PRINCIPE D'ACTION DES FIBRES POLYPROPYLENES (AMANCIO ET AL., 2018)	149
FIGURE V-27: SURFACE DU BETON NON FIBRE ET CELLE DES BETONS RENFORCES PAR DES FIBRES EN POLYPROPYLENE APRES UNE EXPOSITION A UNE TEMPERATURE DE 800 °C (AMANCIO ET AL., 2018).....	150
FIGURE V-28: ECAILLAGE SUR LA SURFACE DES BETONS APRES EXPOSITION A DES TEMPERATURES ELEVEES (BT : BETON TEMOIN SANS FIBRES; BFLB : BETON AVEC FIBRES DE LIN BRUT) (PAGE, 2017A)	150
FIGURE V-29: FOUR UTILISE POUR CHAUFFER LES EPROUVETTES.....	151
FIGURE V-30: PERTE DE MASSE DES FORMULATIONS CIMENTAIRES EXPOSEES AUX TEMPERATURES ELEVEES	151
FIGURE V-31: PERTE DE MASSE DES FORMULATIONS POUZZOLANQUES EXPOSEES AUX TEMPERATURES ELEVEES	152
FIGURE V-32: POROSITE A L'EAU DES MORTIERS CIMENTAIRES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'EXPOSITION	153

FIGURE V-33: POROSITE A L'EAU DES MORTIERS POUZZOLANIQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'EXPOSITION	153
FIGURE V-34: RESISTANCE A LA COMPRESSION DES MORTIERS CIMENTAIRES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'EXPOSITION	154
FIGURE V-35: RESISTANCE A LA COMPRESSION DES MORTIERS POUZZOLANIQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'EXPOSITION.....	155
FIGURE V-36: COMPORTEMENT EN FLEXION DES FORMULATIONS CIMENTAIRES ET POUZZOLANIQUES A PLUSIEURS TEMPERATURES D'EXPOSITION	156



Listes des tableaux

TABLEAU I-1 QUALITES RECHERCHEES POUR UN ECO-MATERIAU DE CONSTRUCTION SELON (AMZIANE ET AL., 2013)	26
TABLEAU I-2 ESTIMATION DES RESSOURCES DE BIOMASSE UTILISEES ET UTILISABLES EN MATERIAUX (DELOITTE, 2016)	27
TABLEAU I-3 : MATERIAUX BIOSOURCES UTILISES DANS LA CONSTRUCTION (NOMADEIS, 2012).....	28
TABLEAU I-4 : CLASSIFICATION DES FIBRES	29
TABLEAU I-5 : LES PROPRIETES DES FIBRES INDUSTRIELLES (CIMBETON, 2013).....	29
TABLEAU I-6 : L'ORIGINE DES FIBRES NATURELLES	30
TABLEAU I-7 : BILAN CHIMIQUE DE PLUSIEURS FIBRES (%) (MWAIKAMBO, 2006)	32
TABLEAU I-8: LES PROPRIETES PHYSIQUES DES FIBRES VEGETALES (MWAIKAMBO, 2006).....	32
TABLEAU I-9: LE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DES FIBRES VEGETALES A 24 H.....	33
TABLEAU I-10: PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES VEGETALES.....	34
TABLEAU I-11: LES DIFFERENTES ZONES DE LA TIGE DE LIN (CHARLET, 2008).....	35
TABLEAU I-12: DIMENSIONS GEOMETRIQUES DE LA FIBRE DE LIN	35
TABLEAU I-13: LES DIFFERENTS SOUS-PRODUITS ISSUS DE LA PAILLE DE LIN ET LEURS PRINCIPALES VOIES DE VALORISATION (CELC MASTERS OF LINEN, 2010).....	37
TABLEAU I-14 : LES DIFFERENTES ZONE DE LA TIGE DE CHANVRE (SEDAN, 2007)	38
TABLEAU I-15 : VALORISATION DES DIFFERENTES PARTIE DE LA PLANTE DE CHANVRE (SEDAN, 2007).....	39
TABLEAU I-16: VARIATION DES PROPRIETES D'ECOLEMENT (VISCOSITE PLASTIQUE ET CONTRAINTE DE CISAILEMENT) EN FONCTION DU DOSAGE DE FIBRES DE POLYPROPYLENE) (TRAN ET AL., 2021).....	41
TABLEAU I-17: INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE FIBRES DE POLYPROPYLENES SUR LA FISSURATION DUE AU RETRAIT PLASTIQUE (BANTHIA AND GUPTA, 2006)	43
TABLEAU I-18: QUELQUES TRAVAUX DE LA LITTERATURE AYANT MIS EN ŒUVRE DES FIBRES DE SISAL, DE CHANVRE OU DE LIN	46
TABLEAU I-19 : VARIATION DU TEMPS D'ECOLEMENT EN FONCTION DU TAUX DES FIBRES DE LIN (CHAFEI, 2014)	47
TABLEAU I-20: EFFET DE L'ADJONCTION DE FIBRES DE CHANVRE SUR LE TEMPS DE DEBUT ET DE FIN DE PRISE SUR PATE CIMENTAIRE (SEDAN, 2007)	48
TABLEAU I-21: CHALEURS D'HYDRATATION MAXIMALES (CHAFEI, 2014).....	49
TABLEAU I-22 : LA VITESSE INITIALE ET LE NIVEAU DE STABILISATION DU RETRAIT (LE HOANG, 2013)	50
TABLEAU I-23: LES FACTEURS INFLUENTS SUR LES PROPRIETES DES COMPOSITES A L'ETAT DURCI (AZIZ, 1984) CITE PAR (MAGNIONT, 2010A)	51
TABLEAU I-24: LE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DES FIBRES D'AGAVE APRES TRAITEMENT PAR UN AGENT HYDROPHOBE (JUAREZ ET AL., 2007)	58
TABLEAU II-1: PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES FIBRES UTILISEES	64
TABLEAU II-2: METHODES DE CARACTERISATION DES MORTIERS	64
TABLEAU II-3: LES CARACTERISTIQUES DES FIBRES POLYPROPYLENES.....	65
TABLEAU II-4: LES METHODES DE MESURE DE LA LONGUEUR DES FIBRES.....	67
TABLEAU II-5: COMPOSITION CHIMIQUE DES FIBRES (TENEURS EXPRIMEES EN % DE LEUR MASSE SECHE).....	70

TABLEAU II-6: TENEUR EN HYDROSOLUBLES DES FIBRES (TENEURS EXPRIMEES EN % DE LEUR MASSE SECHE)	71
TABLEAU II-7: RESISTANCE ET MODULE D'ELASTICITE EN TRACTION DIRECTE DES FIBRES ETUDIEES.....	76
TABLEAU II-8: LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANQUES DU CIMENT UTILISE.....	76
TABLEAU II-9: COMPOSITION CHIMIQUE ET PARAMETRES PHYSIQUES DE LA CHAUX UTILISEE.....	77
TABLEAU II-10: COMPOSITION CHIMIQUE ET PARAMETRES PHYSIQUES DU METAKAOLIN UTILISE.....	78
TABLEAU III-1: NOMENCLATURE DES COMPOSITIONS	86
TABLEAU III-2: COMPOSITION DU MORTIER CIMENTAIRE NON FIBRE (%).....	87
TABLEAU III-3: LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU MORTIER CIMENTAIRE DE REFERENCE.....	87
TABLEAU III-4: COMPOSITION DU MORTIER POZZOLANIQUE NON FIBRE (%).....	87
TABLEAU III-5: LES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DU MORTIER POZZOLANIQUE NON FIBRE	87
TABLEAU III-6: LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES FIBRES UTILISEES ET LEURS DOSAGES	88
TABLEAU III-7: ECART (EN %) PAR RAPPORT AU MORTIER DE REFERENCE.....	91
TABLEAU III-8: COMPOSITION DES MORTIERS CIMENTAIRES EXPRIMEE EN POURCENTAGE MASSIQUE DE LIANT...	91
TABLEAU III-9: COMPOSITION DES MORTIERS POZZOLANIQUE EXPRIMEE EN POURCENTAGE MASSIQUE DE LIANT	91
TABLEAU III-10: NOTATIONS CHIMIQUES	92
TABLEAU III-11: LES CARACTERISTIQUES DU RETRAIT PLASTIQUE (TURCRY, 2004).....	100
TABLEAU III-12: LES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS DISPOSITIFS POUR MESURER LE RETRAIT PLASTIQUE	101
TABLEAU III-13: LES ECART (%) DE LA VITESSE INITIALE ET DU NIVEAU DE STABILISATION DU RETRAIT PLASTIQUE POUR LES MORTIERS FIBRES PAR RAPPORT A LA REFERENCE	104
TABLEAU IV-1 : LES CARACTERISTIQUES DES ESSAIS DU TYPE ASTM C1579 UTILISEES PAR DIFFERENTS AUTEURS	110
TABLEAU IV-2: LES CARACTERISTIQUES DES ESSAIS SUR SUPPORT ADHERENT UTILISES PAR DIFFERENTS AUTEURS	111
TABLEAU IV-3 : LES CARACTERISTIQUES DES MOULES UTILISEES PAR DIFFERENTS AUTEURS.....	112
TABLEAU IV-4: FLUX D'EVAPORATION MASSIQUE DE L'EAU DANS LE TUNNEL	113
TABLEAU IV-5: UN EXEMPLE DE LA FISSURATION OBTENUE POUR LES FORMULATIONS POZZOLANIQUE ET CIMENTAIRES TESTEES	116
TABLEAU IV-6: UN EXEMPLE DE LA FISSURATION OBTENUE POUR LES FORMULATIONS POZZOLANIQUE ET CIMENTAIRES NON FIBREES, AVEC FIBRES DE LIN BRUT ET TRAITE	118
TABLEAU IV-7: LE CRR2 DES FORMULATIONS RENFORCEES PAR LES FIBRES DE LIN BRUT ET TRAITE.	118
TABLEAU IV-8: UN EXEMPLE DE MAILLAGE DE LA FISSURATION OBTENUE POUR LES FORMULATIONS POZZOLANIQUE TESTEES SUR LE SUPPORT BRIQUE	121
TABLEAU IV-9: UN EXEMPLE DE MAILLAGE DE LA FISSURATION OBTENUE POUR LES FORMULATIONS POZZOLANIQUE TESTEES SUR LE SUPPORT BRIQUE AVEC FIBRES DE 6 ET 12 MM	123
TABLEAU IV-10: UN EXEMPLE DE MAILLAGE DE LA FISSURATION OBTENUE POUR LES FORMULATIONS POZZOLANIQUE AVEC LE CRR2 CORRESPONDANT POUR LES FIBRES DE LIN BRUT (PFLB1) ET TRAITE (PFLT1).....	124
TABLEAU V-1: QUELQUES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX POUR EVALUER LA RESISTANCE A L'IMPACT.....	129
TABLEAU V-2: LES DIFFERENTS PARAMETRES DE L'ESSAI A L'IMPACT	131

TABLEAU V-3: LA REDUCTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER CIMENTAIRE PAR RAPPORT AU MORTIER DE REFERENCE (%).....	140
TABLEAU V-4: LA REDUCTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER POZZOLANIQUE PAR RAPPORT AU MORTIER TEMOIN (%)	140
TABLEAU V-5 : PERTE DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION DES FORMULATIONS CIMENTAIRES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	155
TABLEAU V-6 : PERTE DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION DES FORMULATIONS POZZOLANQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	155
TABLEAU V-7: PERTE DE LA CAPACITE PORTANTE EN FLEXION DES FORMULATIONS A BASE CIMENTAIRE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	157
TABLEAU V-8: PERTE DE LA CAPACITE PORTANTE EN FLEXION DES FORMULATIONS POZZOLANQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	157





Introduction

CONTEXTE

Aujourd'hui, le secteur de la construction est pris entre le marteau et l'enclume. D'un côté, l'urbanisation de la planète requiert une réaction immédiate de ce secteur pour répondre aux besoins considérables de la population en constante augmentation, et de l'autre côté, en raison des préoccupations relatives au changement climatique et à l'épuisement des ressources fossiles, une pression importante s'exerce sur les acteurs de la construction. Ces derniers se doivent d'opérer un tournant vers une construction durable et verte pour améliorer leur bilan environnemental. En effet, cette filière consomme plus de 30% des ressources naturelles, voire 50% en considérant le sable et les granulats utilisés sur les chantiers. Ce secteur génère également un quart des déchets solides (World Green Building, 2020). A l'échelle mondiale, la construction est considérée comme le plus gros émetteur de CO₂. Elle est responsable de plus de 36% de la consommation énergétique totale et émet à elle seule 39% des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Jones, 2020). Dans ce contexte, le Conseil Européen s'est engagé à réduire le taux d'émission de GES de 80% d'ici 2050, comparativement à son niveau d'émission de 1990.

Afin d'atteindre ces objectifs, la France se doit d'apporter sa contribution. En effet, le secteur français de la construction consomme plus de 43% d'énergie et génère environ 23% de GES (**Ministère de la Transition écologique, 2020**). Ce secteur est également le premier dans la consommation de matières premières non renouvelables et dans la production de déchets (**Ademe, 2018**).

Cette situation contraint donc la filière au développement de matériaux de construction innovants répondant à la fois aux exigences environnementales et de durabilité. Les matériaux biosourcés ont été identifiés comme ayant un fort potentiel pour le développement d'éco matériaux de construction et pour compenser le déficit mentionné. Les agro ressources, pour la plupart des sous-produits des activités agricoles, sont un bon exemple. Ces matériaux participent à la préservation des ressources naturelles par valorisation de déchets, contribuent à la réduction de la consommation de matières premières d'origine fossile et à la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Ils génèrent aussi de nouvelles filières économiques.

Parmi ces matériaux de construction, les mortiers qui, ces dernières années, sont devenus de plus en plus complexes. Ils sont obtenus par association de liants minéraux hydratés et de granulats auxquels sont ajoutés de nombreux additifs pour améliorer leurs performances. En France, leur exploitation est en évolution croissante depuis 1970 pour des utilisations variées : le hourdage de maçonnerie, les enduits, les chapes, les scellements et les calages....

SUJET TRAITE DANS CETTE ETUDE

Notre étude a été consacrée aux mortiers appliqués en couches minces pour des enduits intérieurs et extérieurs. Leur comportement est fortement lié aux conditions hygrothermiques et aux propriétés des supports sur lesquels ils sont appliqués. Au jeune âge, le contact entre les différents éléments qui constituent un mortier induit un enchaînement de réactions. Le matériau passe ainsi progressivement d'un état fluide à un état solide avec une évolution de la microstructure. Il en résulte des variations dimensionnelles, généralement une diminution du volume. Ce retrait volumique peut être empêché par l'adhérence de l'enduit au support. Le matériau est alors soumis à des contraintes de traction qui peuvent dépasser celles du matériau en cours de durcissement. Ces contraintes de traction génèrent des fissures susceptibles d'affecter le comportement du matériau à court et à long terme et de remettre en cause la durabilité de l'application.

Pour pallier cette pathologie, l'addition de fibres polypropylènes est une solution efficace pour réduire la sensibilité à la fissuration du mortier au jeune âge. L'utilisation de ce type de fibres permet également d'améliorer la résistance à l'impact et la tenue au feu sans avoir besoin de modifier la formulation d'origine. Cependant, les fibres polypropylènes sont fabriquées à base de produits issus du pétrole, une ressource fossile dont nous devons limiter l'exploitation. La production de ces fibres consomme aussi de l'énergie. Enfin, on notera une nouvelle prise de conscience qui impose la réduction des micro plastiques issus de la fin de vie de matériaux très divers et qui se retrouvent dans la nature.

Dans ce contexte et depuis plusieurs années, des travaux de recherches ont été consacrés à l'utilisation de fibres végétales dans les matériaux à base de liant minéral et a montré son efficacité pour améliorer le comportement des matériaux à base cimentaire (Al-Tulaian et al., 2016; Ardanuy et al., 2011; Badagliacco et al., 2020; Ballesteros et al., 2015, 2019; Bertelsen et al., 2019a; Boghossian and Wegner, 2008; Chafei, 2014; Le Hoang, 2012; Savastano et al., 1999; Sedan, 2007).

Notre travail de recherche s'inscrit aussi dans ce contexte. Notre objectif était d'évaluer le potentiel de fibres d'origine végétale, telles que le lin et le chanvre, à se substituer aux fibres polypropylènes comme renfort d'enduits intérieurs et extérieurs. Pour évaluer la capacité des fibres à améliorer les comportements des mortiers, il a été nécessaire de choisir le mortier de référence. Le but était de savoir si, pour des mortiers différents, on peut détecter des performances identiques des fibres végétales en comparaison aux fibres polypropylènes.

La famille des liants est large. Nous avons décidé de travailler sur deux types de liants : un liant cimentaire et un liant chaux/ métakaolin.

Pourquoi le liant cimentaire ?

C'est actuellement le plus exploité dans le domaine de la construction.

Pourquoi le liant chaux /métakaolin ?

C'est un liant caractérisé par un meilleur bilan environnemental ce qui est en adéquation avec la thématique de ce sujet de recherche. Ce liant a déjà été utilisé et optimisé dans notre laboratoire. Il fait aussi partie des solutions visant à maintenir l'efficacité des fibres végétales sur le long terme.

L'objectif du travail de recherche était donc de comparer les performances de formulations d'enduits renforcés par des fibres polypropylènes ou végétales à celles des mortiers de référence non fibrés. Dans ce but nous sommes appuyés sur les propriétés attendues des mortiers renforcés par des fibres polypropylènes. Une fois ces propriétés définies, il s'agissait de sélectionner les essais destinés à quantifier ces propriétés. Enfin, différentes configurations de renforts ont été testées avec une ligne directrice : des règles simples permettant de produire un mortier renforcé par des fibres végétales pouvant concurrencer les mortiers renforcés par des fibres de polypropylène.

Les trois repères de comparaisons utilisés sont les suivants : : Propriétés à l'état frais (rhéologie et temps de prise), sensibilité à la fissuration au jeune âge et propriétés à l'état durci (résistance à l'impact).

PRESENTATION DU MANUSCRIT

Le manuscrit s'articule autour de cinq chapitres.

Le Chapitre 1 dresse un état de l'art sur le contexte environnemental dans lequel s'inscrit l'étude, sur les caractéristiques des fibres polypropylènes et végétales (lin et chanvre) ainsi que sur le comportement des composites renforcés par ce type de fibres.

Le Chapitre 2 présente les différentes caractéristiques des matières entrant dans la composition des mortiers, en portant une attention particulière aux propriétés des fibres de lin, de chanvre et de polypropylène. Ensuite, les différentes méthodes de caractérisation mises en œuvre dans ce travail sont détaillées.

Le Chapitre 3 aborde les différentes formulations fabriquées avec tout d'abord une optimisation de la rhéologie par ajustement de la teneur en eau ainsi que celle en superplastifiant via des essais normalisés. Ensuite, la cinétique de l'hydratation du mortier a été évaluée par le biais du temps de début de prise et en caractérisant l'hydratation du mortier. Le retrait au jeune âge a également été caractérisé. L'impact de différents paramètres est étudié (dosage des fibres, traitement des fibres végétales).

Le Chapitre 4 est dédié à l'évaluation de la sensibilité à la fissuration du mortier au jeune âge. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes mises en œuvre pour quantifier la fissuration à l'état frais et les outils utilisés dans cet objectif. Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus dans le but d'identifier les paramètres prépondérants pour un remplacement judicieux des fibres polypropylènes par des végétales.

Le Chapitre 5 est consacré à la caractérisation des mortiers à l'état durci. Dans ce chapitre, nous avons présenté l'essai que nous avons développé pour déterminer la résistance à l'impact du matériau et le protocole pour détecter l'apparition des fissures et pour identifier la rupture du mortier. Dans un but d'élargir la carte d'identité mécanique des composites, des essais de traction par flexion et en compression ont été également réalisés. Des observations microstructurales au MEB ont été aussi réalisées pour analyser la qualité de l'interface fibre-matrice. Des essais de porosité à l'eau sont venus compléter le tableau. Finalement, l'effet des différents types de fibres sur le comportement des mortiers exposés à de hautes températures a été évalué.

Chapitre I. Contexte et état de l'art

1. INTRODUCTION

Ce premier chapitre aborde tout d'abord les enjeux du développement durable dans la construction. Le contexte environnemental de cette étude sera précisé ainsi que le potentiel des éco-matériaux dans la construction, biosourcés notamment, pour diminuer la consommation de matières premières non renouvelables, limiter les émissions de gaz à effet de serre et créer de nouvelles filières économiques.

Dans un deuxième temps, nous présentons les spécificités des fibres comme renfort dans les composites cimentaires en se focalisant sur les fibres végétales et plus particulièrement les fibres de lin et de chanvre qui sont mises en œuvre dans ce travail. La carte d'identité de chaque fibre (définition, production, valorisation, propriétés physico-chimiques) sera également établie.

Dans la troisième partie, les résultats des travaux antérieurs sur les composites à matrice minérale renforcés par des fibres végétales sont explicités. Les propriétés des composites sont passées en revue : effet des fibres sur la rhéologie à l'état frais, sur l'hydratation, sur la sensibilité à la fissuration au jeune âge et sur la résistance à l'impact. L'effet de ce renfort sur les résistances à la compression et à la flexion est aussi passé en revue

La dernière partie du chapitre est dédiée à la problématique de la durabilité des fibres végétales dans une matrice cimentaire et aux solutions préventives envisagées pour limiter la perte de leur efficacité comme renfort.

2. LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION, LES ENJEUX DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET LES ECO-MATERIAUX

2.1. Problématique environnementale et engagements internationaux

« Le développement durable est celui qui peut répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins ». Cette notion de développement durable a été utilisée pour la première fois dans le rapport « Our Common Future » en 1987 et aussi dans le rapport Brundtland (Brundtland, 1987). Cette vision a été construite grâce à la prise de conscience écologique qui s'est développée sur la limitation des ressources naturelles ainsi que sur les conséquences défavorables des activités humaines sur l'environnement et de la nécessité de réduire leur impact.

Face à une capacité menacée des générations futures à subvenir à leurs besoins, la société contemporaine se retrouve dans une situation critique à plusieurs titres. Les plus importants :

- le réchauffement climatique, conséquence du rejet en quantité importante de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄...) par les activités humaines,
- l'épuisement des ressources naturelles (pétrole, gaz) importantes au fonctionnement de nos sociétés.

Cette prise de conscience a conduit à des engagements nationaux et internationaux qui ont défini des objectifs chiffrés afin de trouver des solutions de ces enjeux environnementaux. En juin 1992, une officialisation de la notion définie par le rapport Brundtland a été faite suite à l'organisation de la conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement à Rio de Janeiro en prenant en compte les piliers suivants : un développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable. Cinq ans plus tard, le protocole Kyoto a été adopté après des débats politiques internationaux lors de la troisième conférence des parties (COP3). Ce protocole est un accord

international qui vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 5,2% pour 37 pays développés sur la période 2008-2012 par rapport à leur niveau de 1990. Ensuite, en 2015, la COP21 qui s'est tenue à Paris a mis en place un nouvel accord qui engage une nouvelle fois les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

En France, dans un but de respecter ces engagements plusieurs dispositifs ont été élaborés :

- le programme national de lutte contre le changement climatique (2000),
- le plan Climat (2004),
- le Grenelle de l'Environnement (2009-2010),
- la loi de transition énergétique pour la croissance verte (2015).

La France envisage aujourd'hui d'atteindre le facteur 4, soit diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050.

2.2. Les impacts environnementaux du secteur du bâtiment

Le secteur de la construction est parmi les secteurs les plus concernés par les enjeux du développement durable. Les chiffres sur lesquels entreprises, institutions et experts s'accordent sont en effet impressionnants : le bâtiment (la construction) représente environ 40% des émissions de CO₂ des pays développés, 37% de la consommation d'énergie et 40% des déchets produits (Deshayes, 2012). En France, le secteur du bâtiment est responsable de 24% des émissions de GES et 46% de la consommation énergétique (SDES, 2019). Le secteur du bâtiment doit agir prioritairement pour repenser et transformer son activité en réduisant ses principaux impacts sur l'environnement :

- ses émissions de gaz à effet de serre,
- sa consommation d'énergie,
- sa consommation de ressources naturelles non renouvelables,
- sa production de déchets.

Il existe un autre point à prendre en considération dans le domaine de la construction : l'utilisation des minéraux qui représentent 45% des matières consommées en France (ciment, chaux). En 2017, plus que 354 millions de tonnes des minéraux ont été consommées ; ceci rend la construction le plus grand consommateur de matières non renouvelables.

En se référant sur les derniers chiffres sortis par le Ministère de la Transition Ecologique, le secteur de la construction est également le premier producteur de déchets. En effet, le secteur du bâtiment est à l'origine de 70% des déchets qui ont un impact sur l'environnement du fait de leur gestion (transport, traitement, tri ou valorisation) défailante.

Toutes ces raisons font du bâtiment un levier clé pour penser au développement durable à travers la lutte contre le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables.

2.3. Substitution des matériaux de construction actuels par des éco-matériaux

2.3.1. L'influence des matériaux de construction sur l'impact environnemental de la filière bâtiment

Depuis plusieurs années, le travail encouragé par les législations européennes et françaises a consisté à viser une baisse des consommations énergétiques en phase d'exploitation des bâtiments. L'optimisation des apports, l'efficacité des systèmes de régulation et l'amélioration de l'isolation ont aidé à réduire la consommation. Cette amélioration a entraîné une nouvelle répartition des consommations énergétiques entre les différentes phases de vie du bâtiment (**Figure I-1**).

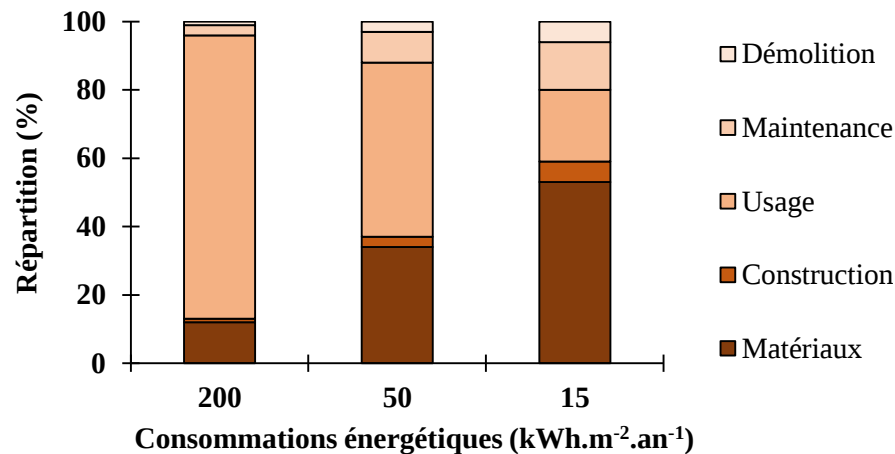


Figure I-1: Distribution des impacts environnementaux en fonction de la performance d'un bâtiment (Lanier et al., 2008)

Cette étude a mis en évidence le poids que prennent les matériaux de construction au fur et à mesure de l'application des réglementations. La **Figure I-1** montre que lorsque la consommation énergétique du bâtiment passe de 200 à 15 kWh.m⁻².an⁻¹, la part des matériaux et de la construction passe de 8% à 60%. Il apparaît ainsi que les matériaux de construction constituent une clef majeure sur laquelle il faudra agir dans l'objectif de réduire l'impact environnemental des bâtiments.

Aujourd'hui, le développement de matériaux de construction à faible impact environnemental est en plein essor. Ces matériaux doivent diminuer les consommations énergétiques liées à la phase de construction, d'exploitation et de démolition. Ces matériaux doivent aussi diminuer les émissions des GES sur toute la durée de leur vie. C'est ici que nous pourrions mettre en relief la notion d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) qui a pour objectif de quantifier les impacts environnementaux tout au long de la durée de vie d'un matériau (production, traitement, utilisation, stockage, recyclage, mise au rebut). L'ACV est une méthode normalisée par la norme ISO 14040 sur le management environnemental.

2.3.2. Les éco-matériaux de construction

Afin de répondre à la problématique de construction durable, le choix des matériaux à mettre en œuvre est une étape importante car le matériau ou l'éco-matériau choisi doit limiter les effets environnementaux pendant sa durée de sa vie et offrir les conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation (**Tableau I-1**).

Caractéristiques techniques	Qualité environnementale
Performances mécaniques	Caractère renouvelable des matières premières
Qualité architecturale	Recyclabilité
Résistance au feu	Energie grise
Economique	Emission de gaz à effet de serre
Confort	Qualité sanitaire
Thermique	
Conductivité, Inertie, Effusivité	
Hygrosopique	
Perméabilité à la vapeur	Emission de COV (construction et exploitation)
Diffusivité en phase vapeur et liquide	Emission de polluants (construction)
Acoustique	Emission de polluants microbiologiques (exploitation)
Coefficient d'absorption	
Indice d'affaiblissement	

Tableau I-1 Qualités recherchées pour un éco-matériau de construction selon (Amziane et al., 2013)

Les matériaux biosourcés ont été identifiés comme ayant un fort potentiel pour le développement d'éco matériaux de construction. Issus d'une ressource locale et abondante, les fibres et les granulats d'origine végétale sont un bon exemple. Ces matériaux participent ainsi à la préservation des ressources naturelles par la valorisation de déchets, à la diminution des consommations de matières premières d'origine fossile, à la limitation des émissions de GES et à la création de nouvelles filières économiques.

2.3.3. Les matériaux biosourcés : potentiel et valorisation dans la construction

Le terme "biosourcé" est utilisé dans le langage courant pour désigner deux types de matériaux : les matériaux biosourcés, qui sont partiellement ou totalement issus de la biomasse (bois, chanvre, balle de riz, paille, lin...) et les matériaux géosourcés, qui sont d'origine minérale (terre crue, pierre sèche). Les matériaux biosourcés dans la construction sont des matériaux innovants qui répondent aux exigences environnementales et de durabilité. Ils sont constitués de matières premières renouvelables qui peuvent être issues de sous-produits ou déchets agricoles.

Le **Tableau I-2** représente une estimation des ressources de biomasse utilisées et utilisables en matériaux. On peut observer que la valorisation de la ressource en matériau est de 0,2% ce qui est encore faible : l'utilisation des matériaux biosourcés a donc un potentiel qui reste à développer.

Ressources		Volume total (10 ³ t / an)	Valorisation en matériau (%)
Cultures dédiées au non alimentaire	Lin fibres	297	43
	Chanvre	53	19
	Miscanthus	33	0
Résidus de cultures annuelles (pailles)	Céréales	66397	>1
	Oléagineux	2645	0
	Lin oléagineux	27	3
Déchets de culture pérennes	Vignes	1750	0
	Vergers	646	0
Industrie céréalière	Blé	2000	0
Industrie de la betterave	Pulpe	1400	0
Total		81965	0,2

Tableau I-2 Estimation des ressources de biomasse utilisées et utilisables en matériaux (Deloitte, 2016)

La famille des matériaux de construction biosourcés est très diversifiée : de nombreuses matières premières, animales ou végétales, peuvent être utilisées (paille, chanvre, lin, liège, miscanthus, laine de mouton, etc.). Ce qui aboutit à des matériaux également de formes et d'utilisation variées : en vrac, panneaux/rouleaux, enduit, béton à bancher, bloc de béton, mur préfabriqué, botte (paille), composite (fibre de bois et résine plastique), colle et mortier.

La **Figure I-2** et le **Tableau I-3** illustrent différentes formes et quelques applications possibles pour les principaux matériaux biosourcés (non exhaustif).



Béton de chanvre
www.bcb-tradical.com



Panneau de liège
www.eco-logis.com



Panneau fibres de lin
www.lemoniteur.fr



Bottes de paille
www.oikos-ecoconstruction.com



Laine de coton
www.futura-sciences.com



Laine de bois
www.conseils-thermiques.org



Béton de miscanthus
www.batirama.com



Exemple de bâtiment
www.futura-sciences.com

Figure I-2: Quelques éléments végétaux dans la construction

	Formes	Matériaux de remplissage
Ouate de cellulose	Ouate en vrac Panneaux semi-rigide	Blocs de béton
Produits du bois	Panneaux rigides et semi-rigides Fibre de bois en vrac - Enduits	Bétons Blocs de bois-béton
Paille	Panneaux rigides	Bottes de paille Terre-paille
Chanvre	Chanvre en vrac Mortiers et enduits	Bétons Blocs de bétons
Lin textile	Rouleaux Mortiers et enduits	Bétons Blocs de bétons

Tableau I-3 : Matériaux biosourcés utilisés dans la construction (Nomadéis, 2012)

3. LES FIBRES : UN RENFORT DANS LES COMPOSITES

La fibre a été définie par (Olesen et al, 1999) comme une cellule caractérisée par une faible largeur par rapport à sa longueur (rapport de 50 à 100). Le terme « fibre » marque donc la forme d'un solide qui pourra être d'origine minérale, artificielle ou naturelle.

Aujourd'hui, on retrouve sur le marché plusieurs types de fibres dont chacune est classée selon son origine, sa forme, ses dimensions, ses propriétés mécaniques et physiques (**Tableau I-4**). Chaque type de fibre est caractérisé par une influence spécifique sur le comportement des composites ce qui la rend apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre (Caramaro, 2005).

Origine	Naturelle (animale, végétale) ou artificielle (synthétique, métallique)
Forme	Droite, aiguille, ondulé, plate....
Dimensions	Macro ou microfibrilles, élanement....
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction - Module d'élasticité
Propriétés physiques	Masse volumique - Coefficient d'absorption d'eau

Tableau I-4 : Classification des fibres

De nos jours, l'utilisation des fibres comme renforts dans les composites cimentaires est en plein essor. Les fibres les plus utilisées dans le domaine de la construction sont les fibres de verre, les fibres métalliques et les fibres synthétiques (polypropylène par exemple). Le **Tableau I-5** donne quelques caractéristiques de ces trois fibres.

Type de fibre	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Diamètre (µm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Acier	7,8	50 - 1000	1000 - 2500	150 - 200	3 - 4
Verre	2,6	9 - 15	2000 - 3500	80	2 - 3,5
Polypropylène	0,9	>4	500 - 750	5 - 10	10 - 20

Tableau I-5 : Les propriétés des fibres industrielles (CIMBETON, 2013)

Dans notre étude bibliographique, on s'intéresse aux fibres végétales et aux fibres synthétiques (polypropylène). Ce type de renfort permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des composites comme la résistance à l'impact et à la rupture. Elles permettent aussi d'améliorer la résistance à la fissuration des composites cimentaires au jeune âge en limitant la propagation des fissures. Pour les fibres polypropylènes, on peut mentionner son influence considérable sur l'amélioration du comportement thermique et de la résistance au feu des composites cimentaires (Bilodeau, 2004; Liu et al., 2008; Olesen et al, 1999). Il est indispensable aussi de noter que l'amélioration du comportement des composites dépend de plusieurs paramètres : dosage des fibres, longueurs, répartitions dans le mélange et adhérence avec la matrice (ABQ, 2005; Bertelsen et al., 2020; Le Hoang, 2013; Page, 2017).

3.1. Les fibres naturelles

Une fibre naturelle est toute matière première présentant un élanement (rapport $L / \varnothing$) > 50 pouvant être obtenue directement à partir d'une source animale, végétale ou minérale (**Tableau I-6**). Elle peut également être définie comme une agglomération de cellules dont le diamètre est négligeable par rapport à la longueur (Bledzki, 1999).

Origine végétale				Origine animale		Origine minérale
Graine	Tiges	Feuille	Fruits	Laine	Poils	Amiante
Coton Kapok	Lin Chanvre	Sisal Abaca	Coco	Mouton	Alpaga Cachemire	

Tableau I-6 : L'origine des fibres naturelles

Dans notre travail, on s'intéresse aux fibres naturelles d'origine végétale issues de la tige de la plante (fibres libériennes). Les sous sections suivantes se focaliseront donc sur ce type de fibres et leurs propriétés.

3.1.1. Les fibres végétales

3.1.1.1. Présentation

Aujourd'hui, l'utilisation de fibres naturelles et plus particulièrement les fibres d'origine végétale est en plein essor. Ces fibres présentent deux principaux avantages.

- les fibres sont disponibles à faible coût et leurs utilisations dans le domaine de la construction offre une opportunité pour diminuer les déchets agricoles.
- l'utilisation des fibres naturelles permet de réduire les impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels car ce sont des matières premières renouvelables et biodégradables qui demandent peu d'énergie pour être produites (Vidil, 2019).

Une fibre végétale est composée de cellulose, d'hémicellulose, des lignines et des autres éléments (pectines, cire...).

La **Figure I-3** montre qu'une fibre végétale peut exister sous plusieurs formes :

- Soit unitaire ou isolée qui correspond à une cellule élémentaire fibreuse,
- Soit regroupée pour former un faisceau des fibres liées ensemble par des pectines et des hémicelluloses (Hepworth et al., 2000).

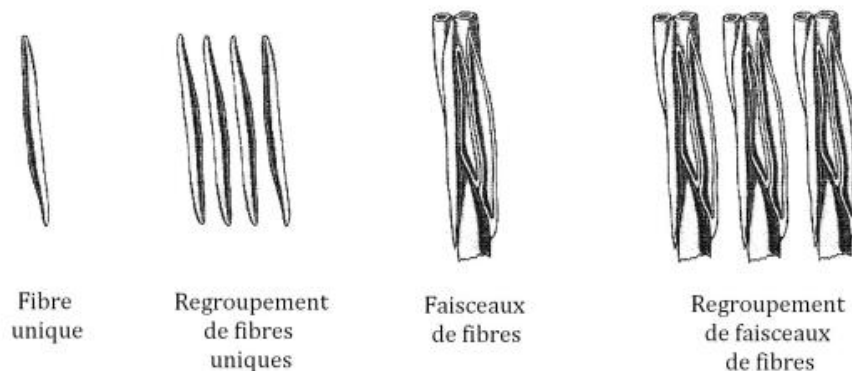


Figure I-3 : Différentes formes de fibres végétales (Jörg Müssig, 1999) cité par (Chafei, 2014; Page, 2017a)

Malgré les points positifs qui caractérisent une fibre végétale, il convient de mentionner qu'il existe également des points faibles : le manque d'uniformité de la qualité des fibres et des conditions de production, les niveaux élevés de variabilité des propriétés des fibres liées à l'emplacement et au moment de la récolte, à la sensibilité à l'humidité ou aux rayons UV. Un bon processus est indispensable pour obtenir des fibres de haute qualité nécessaire à une amélioration des propriétés mécaniques des composites cimentaires (Lumingkewas, 2015).

3.1.1.2. Composition chimique

Les principaux composants chimiques des parois cellulaires des fibres sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il existe aussi la pectine qui est considérée comme le principal liant qui lie les fibres unitaires pour former un faisceau des fibres.

Les celluloses sont le composant structural de base de toutes les fibres végétales. C'est un polymère naturel qui contient des unités de glucose D-anydroglucopyranose (monomère $C_6H_{10}O_5$) reliées entre elles par des liaisons β -(1-4), qui sont à leur tour liées entre elles en faisceaux appelés microfibrilles. La cristallinité de la cellulose est déterminée par la liaison hydrogène qu'elle contient et qui régit les propriétés physiques des fibres naturelles. L'agencement supramoléculaire de sa structure cristalline lui donne une rigidité importante avec un module d'élasticité élevé (Roudier, 2012).

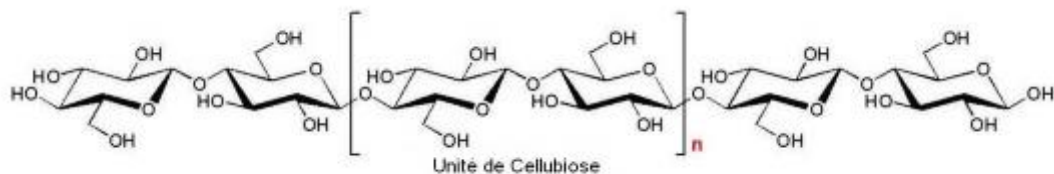


Figure I-4: Structure moléculaire de cellulose (Roudier, 2012)

Les hémicelluloses sont des polysaccharides liés entre eux par des chaînes relativement courtes et ramifiées. Elles sont intimement associées aux microfibrilles de cellulose, enrobant la cellulose dans une matrice. Les hémicelluloses sont très hydrophiles car elles contiennent de nombreux sites pouvant réagir avec l'eau ce qui les rendent responsables de l'absorption d'eau par les fibres.

Les lignines sont des polymères complexes d'hydrocarbures aromatiques qui confèrent de la rigidité aux plantes. Sans les lignines, les plantes n'atteindraient pas de grandes hauteurs. Elles sont un polymère tridimensionnel avec une structure amorphe et un poids moléculaire faible par rapport aux autres constituants chimiques.

Les pectines sont des polysaccharides à structure complexe composée d'une chaîne principale et de chaînes secondaires (Lewin, 2006). Elles existent principalement dans la paroi primaire et entre les microfibrilles (Bourmaud et al., 2013; Gorshkova and Morvan, 2006). Elles sont connues comme de bons chélateurs d'ion calcium. En effet, la chaîne principale, constituée d'acide galacturonique peut se lier à une autre chaîne tout en piégeant l'ion calcium (Sedan, 2007).

Les cires végétales sont des mélanges de longues chaînes substituées d'hydrocarbures aliphatiques. Elles contiennent des alcalins, des acides gras, des alcools primaires et secondaires, des cétones, des aldéhydes.

Le **Tableau I-7** indique la quantité de constituants chimiques pour une large gamme de types de fibres. Une variabilité a été mentionnée au niveau du bilan chimique de chaque type des fibres. Dans plusieurs fibres naturelles, le pourcentage des constituants pris en compte peut ne pas être de 100% parce que certains d'entre eux (pectine, lignine, cires) peuvent être présents en quantités négligeables et considérées comme nulles.

(Bledzki, 1999) a défini l'origine de cette dispersion en notant que les conditions climatiques et l'âge de la plante n'influencent pas uniquement sa structure mais aussi sa composition chimique. Une autre observation a été mentionnée par (Sedan, 2007) qui montre que la période de récolte et la nature des terrains de culture ont aussi une influence considérable sur cette dernière.

Fibre	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectines
Abaca	61 - 64	21	12	0,8
Ananas	80 - 81	17,5	8,3	4
Bagasse	32 - 48	21	20 - 24	10
Banane	60 - 65	6 - 19	5 - 10	3 - 5
Bambou	26 - 43	15 - 26	21 - 31	-
Chanvre	70 - 92	18 - 22	3 - 5	0,9
Coco	46	0,3	45	4
Coton	82 - 96	2 - 6	0,5 - 1	5 - 7
Jute	51 - 84	12 - 20	9	0,2
Kapok	13 - 16	-	-	-
Kenaf	50 - 53	21	17	2
Ramie	68 - 76	14	0,8	1,9 - 2
Sisal	43 - 78	11,5	8	1,2

Tableau I-7 : Bilan chimique de plusieurs fibres (%) (Mwaikambo, 2006)

3.1.1.3. Propriétés physiques

La dispersion observée sur les propriétés géométriques (longueur, diamètre, masse volumique) des fibres végétales (**Tableau I-8**) s'explique de la même manière que celle de sa composition chimique (les conditions climatiques, la culture de la plante, période de récolte...). De plus, (Baley, 2002) a relevé que la dimension de la fibre varie en fonction de sa position dans la tige : une fibre localisée près de la racine est plus épaisse que celle proche de la pointe.

Fibre	Longueur (mm)	Diamètre (μm)	ρ (kg.m ⁻³)
Abaca	4,6 – 5,2	17 - 21,4	1500
Ananas	-	20 - 80	1520 - 1560
Bagasse	1,7	20	550 - 1250
Bambou	2,7	10 - 40	1500
Banane	2 - 3,8	-	1300 - 1350
Chanvre	8,3 - 14,1	17 - 22,8	1400 - 1500
Coco	0,9 - 1,2	16,2 - 19,5	1250
Coton	20 - 64	11,5 - 17	1550
Jute	1,9 - 3,2	15,9 - 20,7	1300 - 1500
Kapok	8- 32	15 - 35	384
Kenaf	2 - 2,7	17,7 - 21,9	1220 - 1400
Ramie	60 - 250	28,1 - 35	1550
Lin	27,4 - 36,1	17,8 - 21,6	1400 - 1500
Sisal	1,8 - 3,1	18,3 - 23,7	1300 - 1500

Tableau I-8: Les propriétés physiques des fibres végétales (Mwaikambo, 2006)

Dans l'identité physique des fibres végétales, il existe un autre paramètre important indispensable à prendre en compte : le coefficient d'absorption d'eau. En effet, l'affinité des fibres végétales envers l'eau induit des conséquences dont on ne peut pas faire abstraction, notamment sur :

- **La consistance du mélange** : si on ne prend pas en considération la quantité d'eau absorbée par les fibres, l'eau de gâchage disponible peut devenir insuffisante induisant des modifications sur la rhéologie du matériau (Sadati and Khayat, 2017).
- **La durabilité du composite** : l'eau absorbée par les fibres végétales pourra entraîner des variations volumiques des fibres affectant l'interface entre la fibre et la matrice (Ramakrishna and Thirumalai, 2005a; Santos et al., 2015).

Le **Tableau I-9** synthétise les coefficients d'absorption d'eau de fibres végétales après 24 heures d'immersion.

Fibre	Absorption (%)	Référence
Lin	136 ± 25	(Magniont, 2010)
	150 ± 15	(Saad et al., 202)
	152 ± 7	(Chafei, 2014)
Chanvre	158 ± 36	(Magniont, 2010)
	178 ± 15	(Saad et al., 2022)
Yucca	203 ± 19	(Magniont, 2010)
Jute	281	(Ramakrishna et al., 2005)
Sisal	200	(Ramakrishna et al., 2005)
	230 ± 16	(Filho et al., 2003)
Coco	100 ± 20	(Filho et al., 2003)

Tableau I-9: Le coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales à 24 h

Les valeurs regroupées dans le tableau ci-dessus montrent que le coefficient d'absorption d'eau des fibres est très élevé. Elles peuvent absorber une masse d'eau qui dépasse leur propre masse. (Magniont, 2010a) a étudié également la cinétique d'absorption d'eau par les fibres de lin, chanvre et yucca (**Figure I-5**)

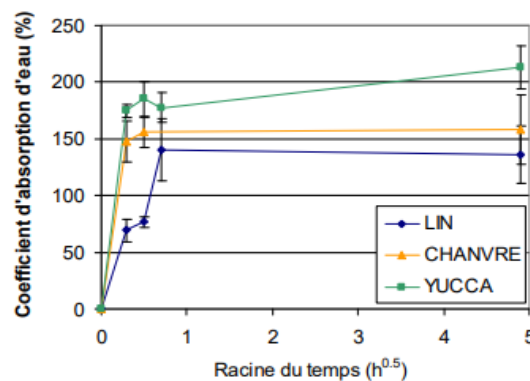


Figure I-5 : La cinétique d'absorption d'eau des fibres de lin, chanvre et yucca (Magniont, 2010a)

L'auteur a noté une différence de la cinétique d'absorption d'eau entre les fibres de lin et de chanvre. Bien que la valeur d'absorption finale soit comparable, les fibres de chanvre se saturent au bout de 5 minutes et la valeur du coefficient est équivalent à celui après 24 heures tandis que, pour les fibres de lin, la saturation n'intervient qu'après 30 minutes d'immersion. Pour les fibres de yucca, l'auteur a mentionné que l'évolution de la quantité d'eau absorbée entre 1 et 24 heures pourrait être liée à une modification chimique des fibres de yucca par réaction avec l'eau.

3.1.1.4. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques regroupées dans le **Tableau I-10** montrent une grande variabilité comme les autres propriétés des fibres végétales. (Baley, 2002) a noté que l'origine de cette dispersion vient de plusieurs paramètres :

- composition chimique de la fibre et sa structure,
- variabilité du diamètre au sein de la même plante
- nombre de défauts transversaux,
- taux d'humidité de la fibre,
- maturité de la plante.

Fibres	Déformation à la rupture (%)	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Référence
Lin	1-4	600 - 2000	12 - 85	(Le Hoang, 2013)
	2	900	50	(Van de Velde et al., 2001)
	1 - 2	800 - 1500	60	(Chafei, 2014)
	1 - 3	798 - 1710	51 - 80	(Page, 2017a)
	2 - 4	467 - 1042	18 - 49	(Le Hoang, 2013)
Chanvre	2	389	35	(Le Hoang, 2013)
	2	690	30 - 60	(Dhakal et al., 2007)
	2	389	35	(Saheb and Jog, 1999)
Sisal	2 - 4	228 - 1002	11 - 27	(Tolêdo Filho et al., 2000)
	5	363	15	(Savastano et al., 1999)
	15	31 - 221	-	(Ramakrishna., 2005)
Coir	14 - 41	108 - 255	3 - 5	(Tolêdo Filho et al., 2000)
	75	15 - 327	-	(Ramakrishna and Thirumalai, 2005a)

Tableau I-10: Propriétés mécaniques des fibres végétales

Une autre étude réalisée par (Bledzki, 1999; Kriker et al., 2005) a mis en évidence l'influence de la longueur des fibres testées sur leur comportement mécanique. La **Figure I-6** et la **Figure I-7** montrent l'évolution de la résistance des fibres de lin et de palmier en fonction de la longueur des échantillons testés. Les résultats obtenus montrent une diminution de la résistance à la traction des fibres de palmier et de lin. (Bledzki, 1999) a noté que cette évolution est liée au matériau qui n'est pas homogène ainsi qu'à la présence de défauts. La rupture de la fibre intervient plus facilement au niveau d'un défaut et plus l'échantillon est long, plus le nombre de défauts est grand.

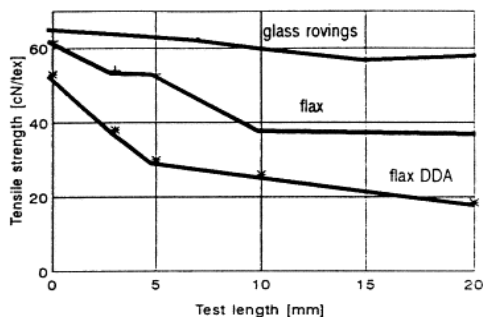


Figure I-6 : Evolution de la résistance en traction de fibres de palmier en fonction de la longueur (Kriker et al., 2005)

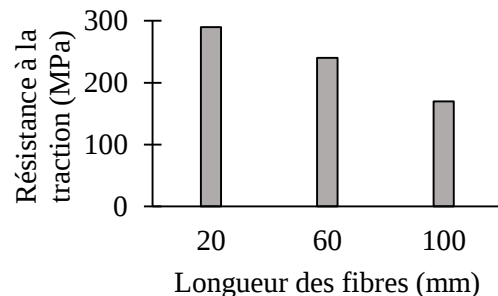


Figure I-7: Evolution de la résistance en traction de fibres de lin en fonction de la longueur (Bledzki, 1999)

3.2. Les fibres de lin

3.2.1. Définition et caractérisation

Le lin est une plante herbacée annuelle de régions tempérées, à croissance rapide et à fleurs bleues. Cette plante appartient à la famille des linacées dont la tige atteint une hauteur de 0,6 à 1,2 m et un diamètre de 1 à 3 mm. La récolte de la plante de lin se fait soit par arrachage manuel soit par des moyens mécaniques. La manière de récolter le lin est importante car elle affecte la nature de la fibre et ses propriétés. En effet, il faut récolter le lin lorsque les tiges sont de couleur jaune-vert. S'il est récolté trop tôt, les fibres trop fines manquent de résistance ; s'il est récolté trop mûr (de couleur brune), il fournit une fibre cassante (Chafei, 2014). Dans la plante de lin, la partie qui nous intéresse est sa tige d'où les

fibres sont extraites. La tige est composée de plusieurs zones concentriques de la périphérie vers le centre (**Tableau I-11**).

Zone	Fonction
L'épiderme	Membrane protectrice composée d'une seule couche de cellules
Le cortex	Système de respiration de la plante
Le phloème	Système de soutien de fibres libériennes
Xylème	Assure la circulation de la sève brute puisée dans le sol par les racines

Tableau I-11: Les différentes zones de la tige de lin (Charlet, 2008)

La **Figure I-8** montre une coupe transversale d'une tige (a) et une analyse microscopique de la fibre unitaire de lin (b). La **Figure I-8a** montre que les faisceaux de fibres sont localisés entre l'écorce et le bois. Les fibres unitaires de lin sont groupées dans des faisceaux de 20 à 40 fibres maintenues entre elles par la pectine. L'analyse microscopique de la fibre de lin (**Figure I-8b**) montre qu'une fibre de lin a une forme polygonale avec 5 à 7 côtés. Selon (Charlet, 2008) et (Baley, 2002), les fibres de lin sont caractérisées par des dimensions géométriques non constantes (**Tableau I-12**).

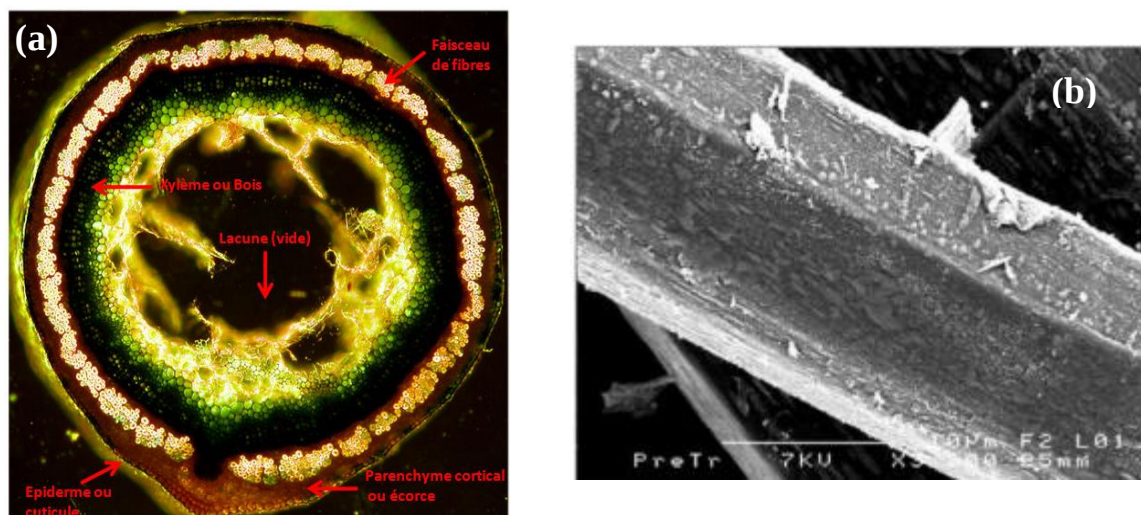


Figure I-8: Coupe transversale de la tige de lin (a) ; Forme polygonale de la fibre de lin (b)

Référence	Diamètre (μm)	Longueur (mm)
(Charlet, 2008)	10 - 30	10 - 80
(Baley, 2002)	5 - 76	3 - 77

Tableau I-12: Dimensions géométriques de la fibre de lin

(Baley, 2002) a caractérisé la structure de la fibre de lin isolée et également au sein des faisceaux. La fibre de lin, comme toutes les autres fibres végétales, est assimilée à un matériau composite renforcé par des fibrilles celluliques. Le composite est constitué principalement d'hémicelluloses, de pectines et de lignine (**la section 3.1.1.2**). Les fibrilles de cellulose sont disposées en spirale selon l'axe de la fibre, formant ainsi un angle, appelé angle microfibrillaire (**Figure I-9**).

La **Figure I-10** montre la structure de la fibre de lin noyée dans un faisceau des fibres à l'échelle microscopique. L'auteur (Baley, 2002) a décrit une fibre de lin comme un empilement de plis constitués d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, elle-même constituée de trois couches : S1, S2 et S3, et d'un vide central appelé lumen et les fibres sont connectées les unes aux autres au sein d'un faisceau par une couche appelée lamelle mitoyenne.

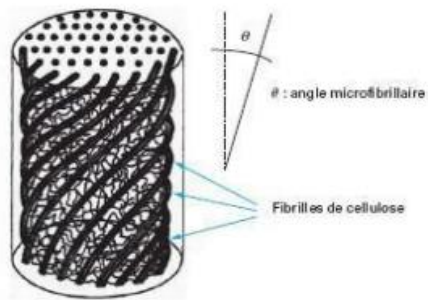


Figure I-9: Structure de base de la fibre de lin
(Baley, 2002)

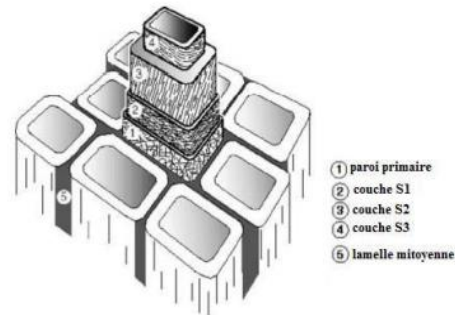


Figure I-10: Structure de la fibre de lin au sein d'un faisceau (Baley, 2002)

3.2.2. Mode de production de fibres de lin

Selon (Baley, 2004a), l'extraction des fibres se fait en 3 étapes successives.

Le rouissage

Cette étape a pour objectif d'éliminer la pectine qui entoure les fibres et les lie à la tige. Le rouissage se fait soit directement sur le sol, dans les champs (**Figure I-11**), soit dans un étang ou une rivière dans lesquels les tiges sont plongées pendant plusieurs jours. Mais aujourd'hui afin d'améliorer la rentabilité, un traitement est privilégié pour assurer le rouissage.

Le teillage

Après le rouissage de la tige de lin, on passe au teillage qui permet d'extraire les fibres rouies. Cette étape permet de battre la matière jusqu'à l'élimination de l'épiderme sous forme de poussière, du bois sous forme de petits fragments et de fibres courtes (**Figure I-12**).

Le peignage

Cette étape correspond au démêlage de la filasse et à l'élimination des débris pour finalement obtenir des nappes puis des rubans par des étirages successifs (**Figure I-13**).



Figure I-11: Tiges de lin rouies au champ (Charlet, 2008)



Figure I-12: Teillage de lin
www.lavoixdunord.fr



Figure I-13: Peignage de lin
www.embrin.fr

La plante de lin est formée de plusieurs parties dont toutes les zones sont valorisées (**Tableau I-13**).

Anas	Graines	Poudre	Fibres (étoupes)
			
Litières - Panneaux Paillage - Isolation	Huilerie	Granulés	Corderie Bâtiment

Tableau I-13: Les différents sous-produits issus de la paille de lin et leurs principales voies de valorisation (CELC Masters of Linen, 2010)

3.2.3. Valorisation du lin

La **Figure I-14** montre les débouchés des fibres courtes de lin.

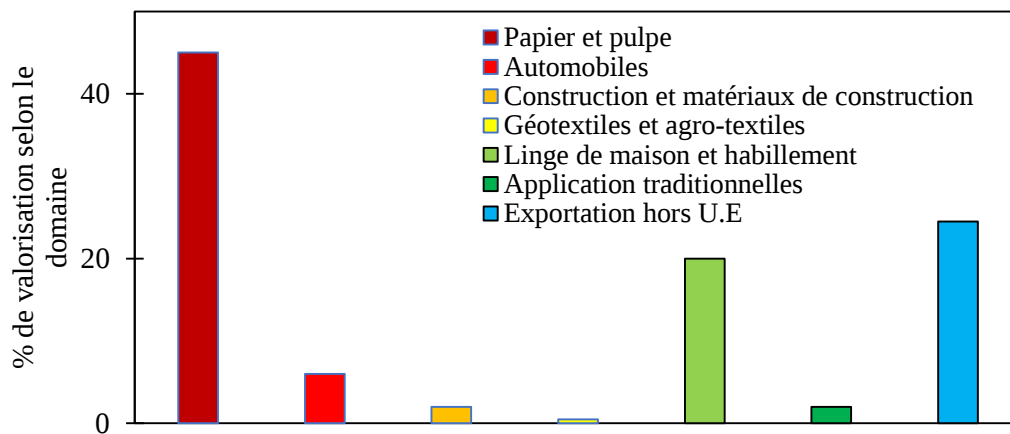


Figure I-14 : Débouchés des fibres courtes de lin (Lumingkewas, 2015)

3.3. Les fibres de chanvre

3.3.1. Définition et caractérisation

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle dont la hauteur varie généralement de 2 à 4 m. Il est cultivé dans les pays tempérés, notamment dans l'Europe de l'Est, en France et en Italie. Comme la fibre de lin, le chanvre est une fibre libérienne c'est-à-dire extraite de la tige de la plante après rouissage dans les champs.

Pour une variété donnée, la date de récolte du chanvre a une influence sur le rendement et plus la date est tardive, plus le rendement est élevé. Le récolte est une étape délicate de la culture du chanvre, elle nécessite du matériel adapté : une moissonneuse pour ramasser les graines et une presse pour conditionner la paille en ballots.

Comme la fibre de lin, la partie qui nous intéresse dans la plante de chanvre est aussi sa tige. La **Figure I-15** montre un coupe transversale de la tige de chanvre réalisée par (Vignon et al., 1995) et la **Figure I-16** présente une analyse microscopique de la fibre de chanvre.



Figure I-15: Coupe transversale d'une fibre de chanvre



Figure I-16: Analyse microscopique d'une la fibre de chanvre

Le **Tableau I-14** montre les différentes parties qui forment une fibre de chanvre avec leurs rôles.

Zone	Description
L'épiderme	Imperméable, constitué d'une couche de cellules à paroi cellulosique
Le cortex	Contient les fibres corticales regroupées en faisceaux
Le bois	Constitué de cellules de parenchyme, de fibres et de faisceaux conducteurs
La moelle	Constituée de parenchyme médullaire
Un espace creux	Occupe plus de la moitié du diamètre de la tige chez les plantes âgées

Tableau I-14 : Les différentes zone de la tige de chanvre (Sedan, 2007)

3.3.2. Mode de production de fibres de chanvre

La fibre de chanvre est obtenue à partir de la tige par une étape de défibrage par battage mécanique.

L'extraction des fibres se fait en 3 étapes successives :

La récolte

La première étape consiste en un fauchage des tiges matures puis la découpe de celles-ci en longueur de 40 cm environ. Cette paille de chanvre est déposée en tas, de faible hauteur, sur toute la longueur du champ : c'est la mise en andain (**Figure I-17**).

Le rouissage

Cette étape est indispensable pour obtenir une production de qualité et durable. Laissés sur le lieu de la récolte, un fanage (retournement) des andains est réalisée. L'alternance de rosée, de pluie et d'ensoleillement provoque un rouissage qui contribue à éliminer les pectines de la plante qui sont préjudiciables à la conservation de la fibre. Les fibres deviendront, après le rouissage (**Figure I-18**), imputrescibles et naturellement exemptes de protéine et n'attirant donc pas les rongeurs ou les mites. Quand la paille atteint un taux d'humidité propre à un défibrage sans pectine (de 14 à 18 % environ), elle est ramassée et pressée en balles qui seront entreposées sous des hangars aérés.

La transformation

Les bottes de chanvre sont débarrassées de leurs liens manuellement. La matière est décompactée pour être ensuite conduite, par air soufflé, vers un défibreux mécanique. Ce dernier permet à la tige de chanvre de se séparer en deux produits principaux : la fibre et la chènevotte.



Figure I-17: La récolte du chanvre
www.poitou-chanvre.com



Figure I-18: Le rouissage du chanvre
www.futura-sciences.com

3.3.3. Valorisation du chanvre

La **Figure I-19** présente le pourcentage des composants qui constituent la plante de chanvre (**Vignon, 2014**).

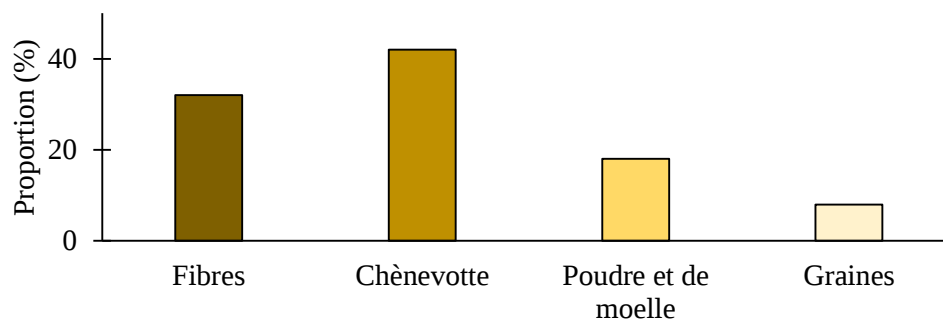


Figure I-19: Les différents composants de la plante du chanvre (%) (Vignon, 2014)

Les différents composants de la plante de chanvre peuvent être valorisés dans divers domaines. En raison de l'existence de ces multiples voies de valorisation pour tous ses constituants, le chanvre est une plante qui s'intègre parfaitement dans une dynamique de développement durable.

Le **Tableau I-15** présente les domaines de valorisation des différentes parties de la plante de chanvre.

Fibres	Chènevotte	Poudre	Chènevis
			
Composites polymères Laine de chanvre Béton de chanvre	Panneaux de particules Isolation Béton de chanvre	Litière animale après granulation Amélioration des sols	Alimentation humaine et animale Produit cosmétique

Tableau I-15 : Valorisation des différentes parties de la plante de chanvre (Sedan, 2007)

4. CARACTERISTIQUES DES COMPOSITES CIMENTAIRES INCORPORANT DES FIBRES POLYPROPYLENES ET VEGETALES

Le béton ou mortier fibré est un matériau constitué d'un ensemble de fibres résistantes noyées dans une matrice dans le but d'améliorer ses propriétés mécaniques. Les fibres sont considérées comme un renfort tandis que la matrice assure la cohésion du composite et le transfert des efforts aux fibres à travers une zone qui s'appelle la zone de transition ou bien l'interface matrice-fibre.

Depuis l'antiquité, les fibres sont utilisées pour renforcer des matériaux fragiles. À l'époque des Pharaons, les briques renforcées par de la paille et du crin de cheval sont présentes. Dans les années 1900, l'amiante-ciment est le premier composite largement fabriqué avec l'invention du procédé Hatchek pour la fabrication des plaques de fibrociment (Bentur et Mindess, 2007). Après l'utilisation de fibres d'amiante, l'intérêt du secteur industriel pour les matériaux renforcés de fibres s'est accentué du fait du nombre conséquent de recherches en cours sur cette thématique (Page, 2017a). Dans le domaine de la construction, il existe plusieurs types de fibres utilisées avec un liant minéral (ciment) : fibres d'acier, de verre, de carbone, synthétiques (polypropylène, nylon) et naturelles (lin, chanvre, jute, sisal, coco...). Dans notre étude, notre attention se porte sur les fibres polypropylènes et végétales.

L'association des fibres avec un matériau fragile comme la matrice cimentaire permet d'éviter la rupture brutale du matériau par la capacité des fibres à transférer des contraintes à travers la fissure.

Les fibres incorporées ont pour rôle :

- de contrôler l'ouverture et donc de limiter la propagation des microfissures,
- de mieux répartir les contraintes mécaniques,
- de conférer une résistance résiduelle post-fissuration et ainsi de limiter la fragilité du composite cimentaire.

Il faut mentionner aussi que le rôle des fibres dans l'amélioration des résistances citées ci-dessus dépend de plusieurs paramètres :

- le dosage,
- la nature,
- les propriétés mécaniques de la fibre et celles de la matrice,
- la répartition dans le mélange.

Selon le type de fibre utilisée, les fibres permettent de limiter la sensibilité à la fissuration causée par le retrait plastique. Et lorsque cette fissuration ne peut être évitée, ce renfort par des fibres induit une multi fissuration, plus fine, moins longue et moins préjudiciable vis-à-vis des propriétés mécaniques et de transfert. A part l'effet des fibres sur le contrôle de la fissuration, d'autres effets ont été mentionnés comme l'amélioration de la tenue au feu du composite cimentaire renforcé par des fibres polypropylènes (Bilodeau, 2004) (Ezziane et al., 2015) (Liu et al., 2008).

4.1. Composite cimentaire incorporant des fibres synthétiques

La famille de fibres synthétiques est très large et les fibres polypropylènes sont les plus utilisées dans les matériaux à base de liants minéraux. Notre étude se focalisera donc sur ces types de fibres avec pour objectif d'en trouver une alternative biosourcée. Les fibres polypropylènes sont obtenues par extrusion du polypropylène et se présentent sous forme de faisceau (**Figure I-20**) ou de filament individuel (Guiraud, 2018). Le polypropylène est une matière plastique qui se présente sous forme d'une molécule de polyoléfine saturée formée de chaînes linéaires dont le motif est $(CH_2=CH-CH_3)$ répétées par l'opération de la polymérisation (**Figure I-21**) (Tripathi, 2002).



Figure I-20: Les fibres polypropylènes

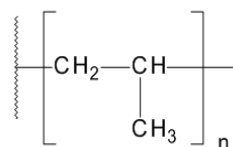


Figure I-21: Motif à la base du polypropylène

4.1.1. Propriétés à l'état frais

4.1.1.1. La rhéologie

Comment tout autre type de fibres, l'incorporation de fibres polypropylènes dans le béton induit une modification sur le comportement du matériau à l'état frais. Dans la littérature, on peut noter que le changement de la rhéologie du béton dépend de plusieurs paramètres : la longueur, le taux d'incorporation, la rigidité, la morphologie (Al-Tayyib et al., 1988; Martinie et al., 201; Sultangaliyeva et al., 2018). Il existe une teneur en fibres critique pour laquelle la densité de contacts entre les fibres, les granulats et le liant est acceptable. Cependant, au-delà de ce taux critique, des interactions entre les fibres et le squelette granulaire sont telle qu'elles impactent négativement l'ouvrabilité du matériau (Martinie et al., 2010).

Une étude a été réalisée par (Tran et al., 2021) sur l'influence de dosage en fibres sur la viscosité du béton à l'état frais. A l'aide d'un rhéomètre, les auteurs ont déterminé le seuil de cisaillement sur plusieurs formulations (Tableau I-16).

Dosage de fibres (kg.m ⁻³)	Viscosité (Pa.s ⁻¹)	Contrainte de cisaillement (Pa)
1,35	326	1466
2,7	388	1803
5,4	499	2292

Tableau I-16: Variation des propriétés d'écoulement (viscosité plastique et contrainte de cisaillement) en fonction du dosage de fibres de polypropylène) (Tran et al., 2021)

Les auteurs ont noté que la viscosité dynamique et la contrainte de cisaillement augmentent avec le dosage en fibres. Cette modification a été attribuée par les auteurs à l'état de la zone de friction entre les granulats. En effet la présence de fibres polypropylènes peut jouer le rôle d'aiguilles qui interviennent sur cette zone ce qui augmente la rigidité du matériau et par conséquent la contrainte de cisaillement exercée.

4.1.1.2. La fissuration au jeune âge

Les fibres polypropylènes sont très réputées par leur capacité à mieux contrôler les effets du retrait plastique du béton et sa sensibilité à la fissuration (Banthia and Gupta, 2006; Bertelsen et al., 2019b; Filho and Sanjuán, 1999; Sadiqul Islam and Gupta, 2016).

Une étude a été réalisée par (Messan, 2006) sur les effets de l'addition de 0,1% en masse de fibres de polypropylènes (longueur de 6 mm) dans le béton. Les résultats sont présentés dans la **Figure I-22**. L'auteur a noté une différence sur les points suivants : le temps marquant le début d'infléchissement de la courbe du retrait, la pente de la première phase du retrait, l'âge du retrait maximal et la valeur maximale du retrait plastique. L'addition de fibres polypropylènes réduit le temps de développement de la première phase et diminue légèrement la pente associée à cette phase quasi linéaire du retrait. L'infléchissement de la courbe apparaît plus tôt pour les mortiers incorporant des fibres polypropylènes et la valeur maximale du retrait est plus petite que celle du mortier de référence. L'auteur a attribué cette modification du retrait plastique à l'amélioration de la cohésion du mortier en présence de fibres de polypropylènes et à leur module d'élasticité qui dépasse celui du mortier au jeune âge.

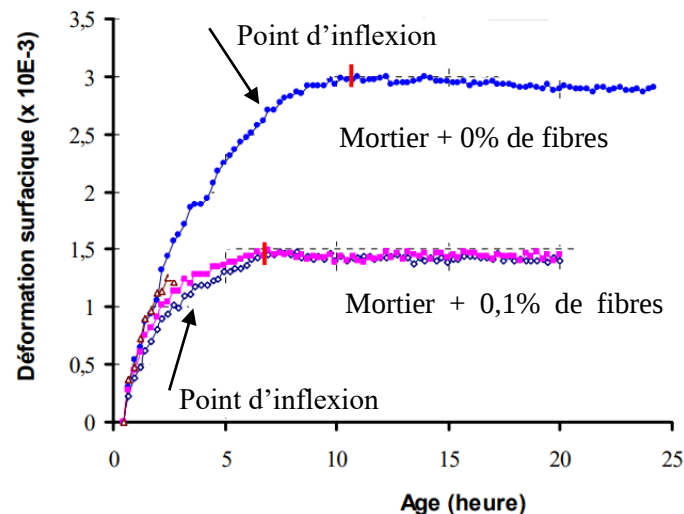


Figure I-22: Influence des fibres sur l'évolution du retrait plastique (Messan, 2006)

Une autre étude a été réalisée par (Sadiqul Islam and Gupta, 2016). Elle a consisté à évaluer l'influence de plusieurs dosages en fibres polypropylènes sur la fissuration due au retrait plastique. Les auteurs ont constaté une réduction de la fissuration qui se traduit par une diminution de la surface et de l'ouverture des fissures pour toutes les formulations renforcées par les fibres. Cette réduction augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres (**Figure I-23**).

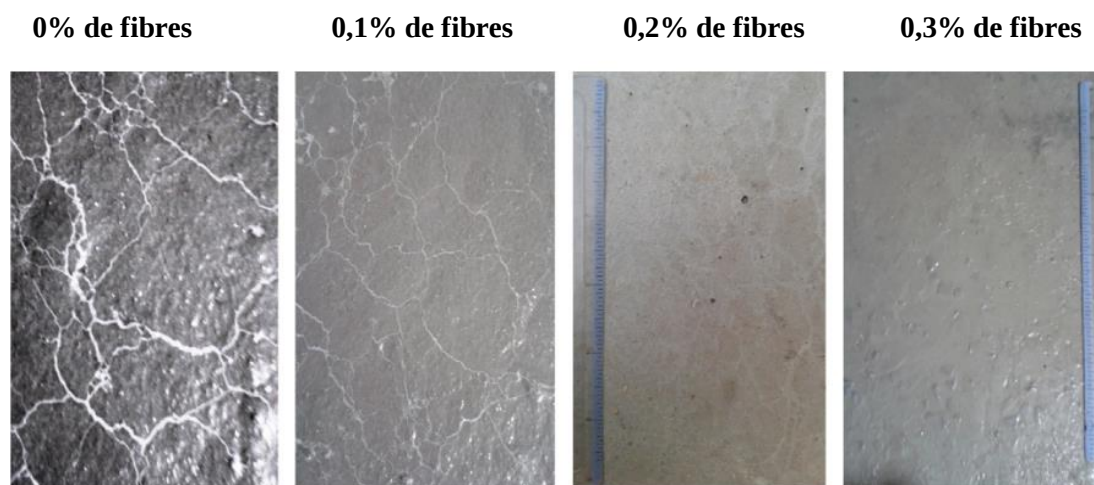


Figure I-23: Comparaison de la fissuration due au retrait plastique entre une formulation cimentaire non fibrée et des formulations renforcées par plusieurs dosages en fibres de polypropylène (Sadiqul Islam and Gupta, 2016)

Le travail de (Banthia and Gupta, 2006) a mis en évidence l'effet significatif des caractéristiques géométriques des fibres de polypropylènes sur la fissuration due au retrait plastique. Le **Tableau I-17** présente la surface totale de fissuration et l'ouverture maximale des fissures obtenues sur 4 formulations.

Les formulations sont les suivantes :

- F0 : formulation témoin (sans fibres),
- F1 : formulation avec fibres (L = 12,5 mm, d = 20 μ m),
- F2 : formulation avec fibres (L = 12,5 mm, d = 30 μ m),
- F3 : formulations avec fibres (L = 6,4 mm, d = 30 μ m).

Formulations	Surface totale de fissuration (mm ²)				Ouverture maximale de la fissure (mm)			
	0%	0,1%	0,2%	0,3%	0%	0,1%	0,2%	0,3%
F0	330				3,0			
F1		121	4	-		1,3	0,1	-
F2		216	120	102		1,3	1,0	0,8
F3		258	243	154		2,0	1,4	1,4

Tableau I-17: Influence des caractéristiques géométriques de fibres de polypropylènes sur la fissuration due au retrait plastique (Banthia and Gupta, 2006)

Les auteurs ont mentionné que la variabilité des résultats entre les différentes formulations testées revient à l'état d'adhérence et à la qualité d'ancrage fibre/matrice. Une longueur importante permet d'avoir un bon ancrage de la fibre dans la matrice ce qui facilite le transfert de contrainte à travers la fissure.

4.1.2. Propriétés à l'état durci

4.1.2.1. Comportement en compression

L'évaluation de la résistance à la compression est un des principaux indicateurs de la qualité d'un matériau cimentaire à l'état durci. Dans cette partie, on s'intéresse à l'effet des fibres de polypropylènes sur le comportement du béton en compression. Beaucoup d'études ont été faites à ce sujet.

(Saidani et al., 2016) ont étudié l'influence de 1% (en volume du liant) de fibres de polypropylènes (longueur 6 mm) sur la résistance à la compression d'éprouvettes cubiques de 100 mm de côté. Les résultats obtenus à 7, 14 et 28 jours ont montré une légère chute de 1,3, 0,77 et 0,34%.

Une autre étude a été réalisée par (Vinay Kumar Singh, 2014) sur l'influence des fibres de polypropylène sur la résistance à la compression du composite cimentaire à 28 jours. Les teneurs en fibres sont : 0 - 0,1 - 0,4 - 0,7 - 0,9 % (en volume du liant). Les fibres utilisées avaient une longueur de 9 mm. Les résultats obtenus ont montré une légère augmentation de l'ordre de 1,2 - 4,6 - 4,0 - 2,5% par rapport au béton de référence respectivement (**Figure I-24**).

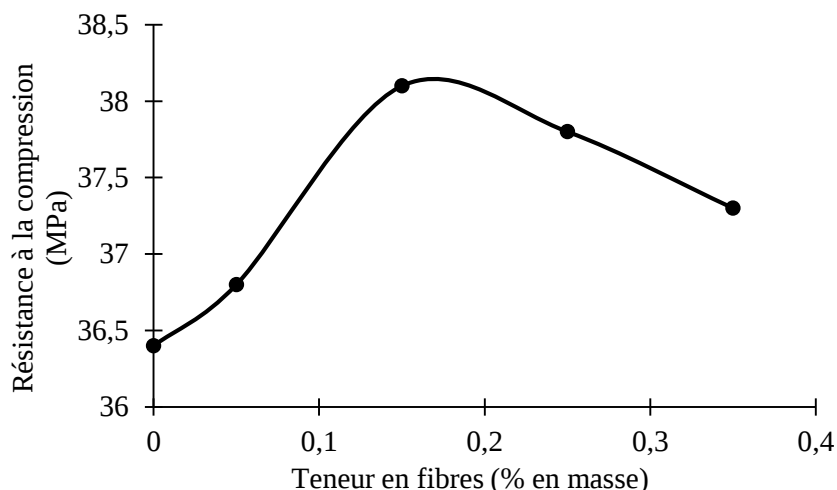


Figure I-24: Résistance à la compression en fonction du dosage en fibres polypropylènes de 9 mm de longueur (Vinay Kumar Singh, 2014)

Pour étudier l'effet de la longueur des fibres sur la résistance à la compression, (Najimi et al., 2009) ont utilisé trois longueurs différentes de fibres polypropylènes (6, 12 et 19 mm) avec un dosage de 2 kg.m⁻³. La résistance a été déterminée sur des matériaux cimentaires âgés de 7, 28, 56 et 90 jours. Les

résultats présentés à la **(Figure I-25)** montrent que toutes les formulations fibrées ont eu une légère chute de la résistance par rapport au béton référence, la plus faible résistance a été observée pour la plus petite longueur. A 28 jours, les résultats montrent que l'ajout de fibres polypropylène de 6, 12 et 19 mm diminue légèrement la résistance à la compression par rapport au béton de référence. Par contre, il y a une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la longueur de la fibre. Dans tous les cas, on peut constater que l'ajout de fibres polypropylènes ne pénalise pas beaucoup la résistance à la compression du béton.

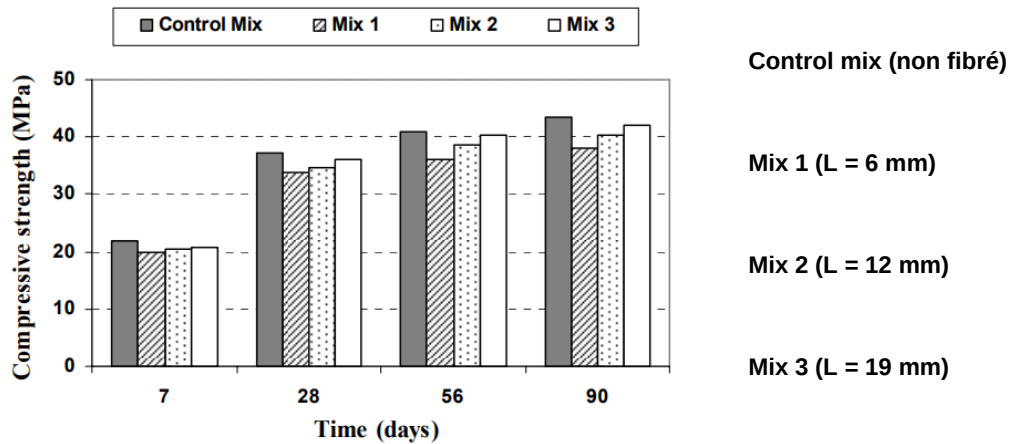


Figure I-25: Résistance à la compression du béton en fonction de la longueur des fibres (Najimi et al., 2009)

4.1.2.2. Comportement en flexion

Un des objectifs de l'incorporation de fibres dans le béton est d'améliorer son comportement post-fissuration. Le béton renforcé par des fibres a de nombreuses applications comme les dalles, les éléments préfabriqués ou les revêtements de tunnel en béton projeté. La fibre de polypropylène est utilisée pour améliorer la faible résistance résiduelle post fissuration dans le but d'avoir un matériau moins fragile (Najimi et al., 2009; Orouji et al., 2021; Tripathi, 2002).

L'étude réalisée par (Orouji et al., 2021) a montré que l'incorporation de 0,5% de fibres en polypropylène (% en masse) permet d'améliorer le comportement post-fissuration par rapport au béton de référence **(Figure I-26)**. Les auteurs ont attribué cette amélioration à l'effet de pontage exercé par les fibres après l'initiation de la première fissure.

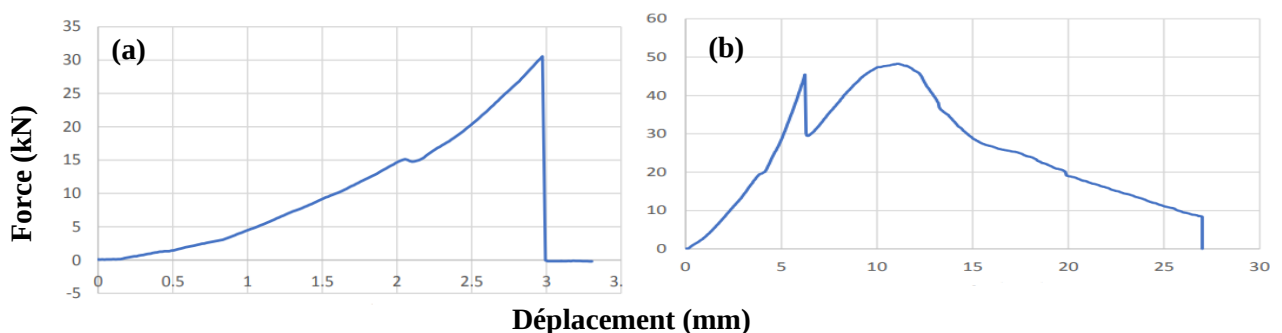


Figure I-26: Comportement en flexion d'un béton de référence (a) et d'un béton renforcé par 0,5% de fibres de polypropylène (Orouji et al., 2021)

Dans la même étude, l'influence du dosage des fibres sur le comportement en flexion du béton a été étudiée. Les auteurs ont identifié un dosage critique en fibres qui vaut 1,5% (en masse de liant). Au-delà

de ce dosage, le malaxage devient plus compliqué et une perturbation aura lieu au niveau de la distribution des fibres ce qui induit une diminution de la résistance en flexion (**Figure I-27**).

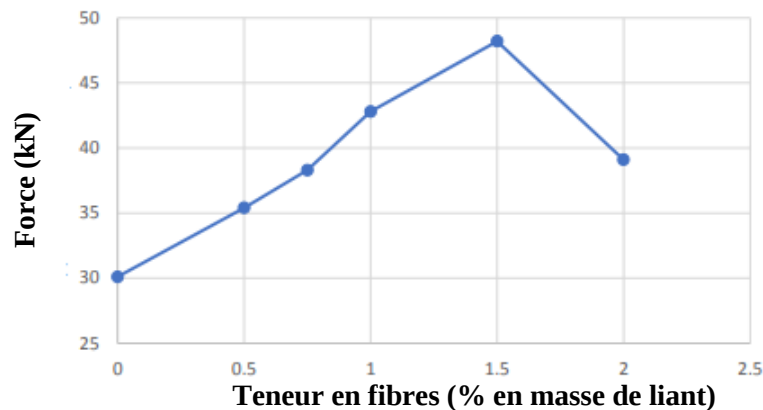


Figure I-27: Capacité portante maximale en flexion en fonction du dosage de fibres de polypropylène (Orouji et al., 2021)

Une autre étude réalisée par (Akhmetov et al., 2022) sur l'effet des propriétés géométriques des fibres de polypropylène montre une comparaison de la résistance en flexion entre plusieurs formulations cimentaires avec plusieurs longueurs et dosage de fibres (**Figure I-28**).

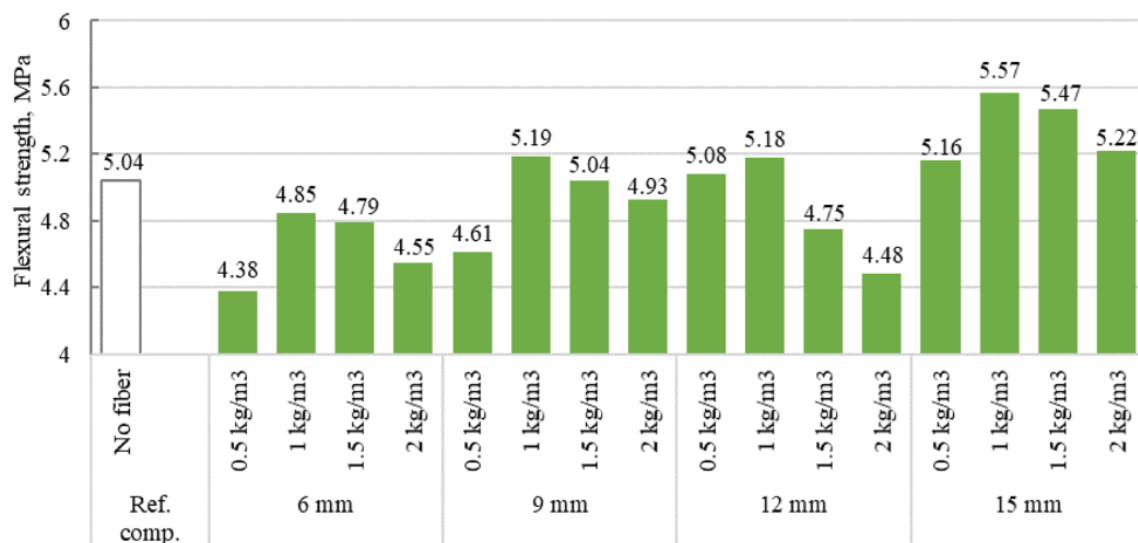


Figure I-28: Effet de la longueur et du dosage en fibres sur la résistance à la flexion du béton (Akhmetov et al., 2022)

Les résultats obtenus montrent que la résistance en flexion varie avec les critères géométriques des fibres. Avec une longueur de 6 mm, les auteurs ont noté une diminution de la résistance par rapport au béton non fibré. Ceci est lié au faible ancrage entre la fibre et la matrice ce qui pénalise le transfert de charges et induit une diminution de la résistance en flexion. De plus, cette étude a permis de montrer qu'il existe un dosage en fibres optimal et également une longueur critique des fibres. Cependant, une corrélation entre la longueur et le dosage doit être réalisée pour définir les valeurs optimales de chaque paramètre. Ces conclusions ont ensuite été confirmées dans plusieurs autres travaux (Faraj et al., 2019; Leong et al., 2020; Yao et al., 2019).

4.1.2.3. Comportement au feu

Le béton est un matériau poreux avec un degré de saturation en eau. Cette eau excédentaire est nécessaire à l'ouvrabilité du béton à l'état frais. Dans le cas d'une élévation importante de la température, l'eau restée prisonnière se vaporise créant une surpression interne qui peut entraîner un écaillage du béton en surface. La tenue au feu est un aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés. Les fibres métalliques n'apportent pas un bénéfice déterminant dans la tenue au feu des structures. Par contre, les microfibres de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique. Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion entre 140 et 170 °C) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu qui peut alors s'échapper et réduire la pression dans les pores. Ce phénomène constitue un moyen efficace pour limiter l'écaillage de surface d'un béton soumis à une élévation de température excessive (CIMBETON, 2013; Ezziane et al., 2015; Missemmer, 2011; Page, 2017).

4.2. Les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales

Aujourd'hui, l'utilisation des fibres naturelles dans les matériaux de construction se développe. La littérature rapporte des résultats sur les propriétés mécaniques et les performances physiques du composite cimentaire renforcés par de telles fibres (**Tableau I-18**).

Fibre	Références
Sisal	(Ferreira et al., 2012; Filho and Sanjuán, 1999; Fujiyama et al., 2014; Savastano et al., 1999; Swift and Smith, 1979; Toledo Filho et al., 2000)
Chanvre	(Asprone et al., 2011; Dhakal et al., 2007; Garcia- et al., 1998; Li et al., 2004, 2006; Magniont, 2010a)
Lin	(Baley, 2002, 2002; Bourmaud et al., 2013; Chafei, 2014; Gorshkova and Morvan, 2006; John and Anandjiwala, 2009; Le Hoang, 2013; Magniont, 2010a; Page, 2017a; Saad et al., 2022)

Tableau I-18: Quelques travaux de la littérature ayant mis en œuvre des fibres de sisal, de chanvre ou de lin

D'après ces travaux, nous allons présenter par la suite les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales à l'état frais et à l'état durci.

4.2.1. Propriétés à l'état frais

4.2.1.1. La rhéologie

La maniabilité du matériau est un paramètre important à prendre en considération car il est indispensable d'avoir un mélange applicable similaire à la référence non fibrée. En effet, un mélange très sec peut induire un produit peu maniable et mal compacté avec beaucoup de pores voire des nids d'abeilles ce qui engendre des difficultés de mise en place et des mauvaises propriétés mécaniques.

L'ajout des fibres végétales affecte la maniabilité du composite cimentaire selon deux aspects.

- le caractère hydrophile des fibres (Baley, 2004a; Magniont, 2010a) conduit à une diminution de la maniabilité de la matrice minérale renforcée par ce type de fibres. La compensation de cette demande en eau supplémentaire se fait par un ajustement du rapport E/L, l'utilisation de superplastifiant ou le prétraitement des fibres.

- la formation d'oursins de fibres lors du malaxage (Sedan, 2007) dépend du type, de la longueur et de la fraction massique des fibres (Bentur and Mindess, 2007; Le Hoang, 2013). Afin d'éviter ces agglomérations, certaines dispositions peuvent être prises lors du malaxage comme l'addition progressive des fibres ou bien l'addition d'un superplastifiant réducteur d'eau qui permet également d'augmenter la maniabilité, sans nuire aux performances mécaniques du composite (Amziane et al., 2013; Chafei, 2014). De plus, des prétraitements des fibres pourront aussi être réalisés afin d'améliorer leur dispersion dans le mélange.

(Le Hoang, 2013) a étudié l'effet du taux volumique des fibres de lin (1, 2 et 3,5 %) avec une longueur de 10 mm sur la maniabilité du matériau cimentaire (**Figure I-29**). L'auteur a noté une diminution de la maniabilité du mélange avec l'augmentation de la quantité des fibres. Les mortiers sont passés d'un niveau de maniabilité classé ouvrable (temps d'écoulement < 6s) pour un mortier normal à un niveau peu maniable ($6s < t < 20s$).

Une autre étude sur l'effet de l'ajout des fibres de lin sur la maniabilité du matériau a été réalisée par (Chafei, 2014). Le **Tableau I-19** montre les résultats obtenus.

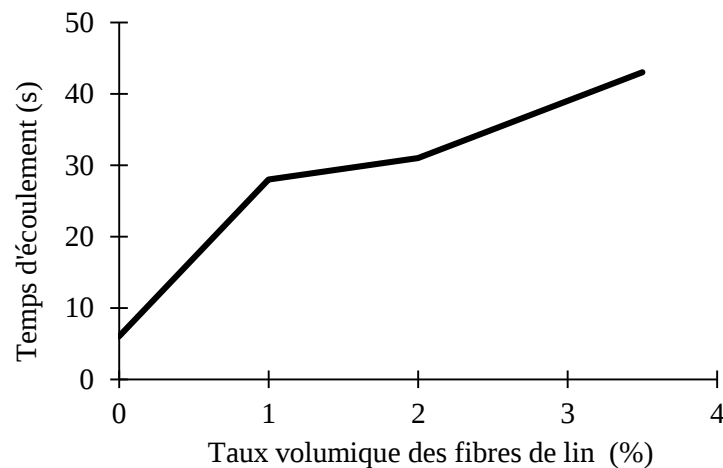


Figure I-29 : Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en fibres (Le Hoang, 2013)

Taux des fibres de lin (%)	Temps d'écoulement (s)
0	2
2	55
3	>60
4	>60

Tableau I-19 : Variation du temps d'écoulement en fonction du taux des fibres de lin (Chafei, 2014)

L'auteur a noté une forte augmentation du temps d'écoulement pour les formulations fibrées par rapport au mortier témoin. Cette augmentation a été attribuée à la méthode de malaxage inadaptée ce qui induit une mauvaise dispersion des fibres dans le mélange et l'obtention d'un mélange compact formant un bloc. Ceci freine son écoulement dans le maniabilimètre même sous l'effet de la vibration.

Un autre essai qui permet d'évaluer la rhéologie du matériau a été mis en œuvre par (Page, 2017a); il s'agit de l'étalement. L'auteur a trouvé que l'incorporation de 1% en volume de fibres de lin affecte considérablement l'étalement du mortier. Un étalement après vibration de 175% (étalement relatif par rapport au diamètre initial du cône d'essai de 10 cm) pour un mortier non fibré est passé à 14% pour un mortier avec les fibres de lin ce qui correspond à une maniabilité quasi nulle pour un mortier.

4.2.1.2. L'hydratation cimentaire

L'ajout des fibres végétales dans le mortier cimentaire provoque un retard de prise comme le relèvent plusieurs auteurs (Chafei, 2014; Page, 2017a; Sedan, 2007). Le retard de prise a été attribué à la présence de sucres libres issus des fibres végétales. A l'issue d'une étude réalisée par (Fisher, 1974) citée par (Sedan, 2007) sur les fibres de bois, l'auteur a lié le retard de prise à la dégradation de carbohydrates solubles en acides sacchariniques qui sont considérés comme des agents retardateurs de prise.

(Sedan, 2007) a étudié l'effet de l'ajout des fibres de chanvre (2% en volume) sur le temps de prise d'une pâte cimentaire (**Tableau I-20**).

Temps de prise	Ciment + eau	Ciment + eau + fibres
Début	350 min	420 min
Fin	400 min	460 min

Tableau I-20: Effet de l'adjonction de fibres de chanvre sur le temps de début et de fin de prise sur pâte cimentaire (Sedan, 2007)

L'auteur a observé que l'incorporation des fibres de chanvre induit un retard du début de prise d'environ 70 minutes mais la durée totale de la prise reste inchangée dans ce cas si l'on compare une pâte non fibrée et à celle renforcée par des fibres. L'auteur a ensuite effectué une dilution des échantillons de ciment portland (E/C=2) qui ont été mélangés avec différents taux de fibres de chanvre dans un but de caractériser le retard de prise observé. Après l'extraction de la phase aqueuse, les concentrations en ions calcium, silicium, aluminium et fer ont été déterminées par analyse chimique ICP (**Figure I-30**).

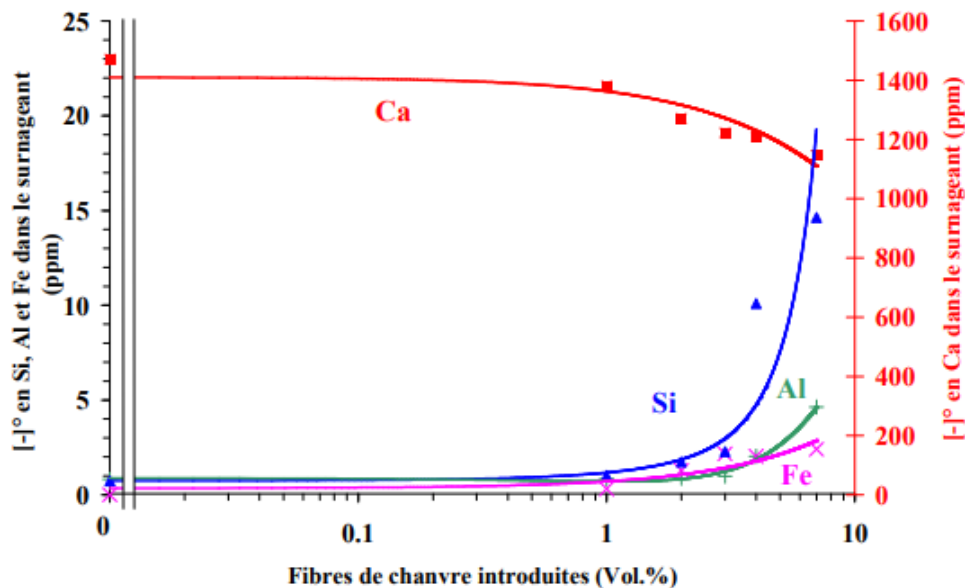


Figure I-30: Evolution de la concentration en calcium, silicium, aluminium et fer dans la pâte de ciment fibrée (Sedan, 2007)

Les résultats obtenus montrent que la quantité des ions calcium diminuent avec l'augmentation du taux des fibres. Cette diminution rend la concentration de calcium trop faible dans la pâte cimentaire pour permettre la formation d'un gel de silicate de calcium hydraté C-S-H ce qui explique la perturbation observée au niveau de l'hydratation cimentaire.

D'autres auteurs ont mené des essais de calorimétrie isotherme sur un mélange cimentaire renforcé par des fibres de peuplier (Govin et al., 2006) et des fibres de lin (Chafei, 2014; Page, 2017a). Les résultats obtenus ont montré que le bois joue le rôle d'inhibiteur d'hydratation du ciment. Pendant 48

heures, la quantité de chaleur dégagée en présence de bois est plus faible que celle du ciment témoin ce qui est en accord avec un retard d'hydratation et confirme l'observation réalisée par (Sedan, 2007).

Le **Tableau I-21** récapitule les chaleurs d'hydratation maximales obtenus sur un mélange cimentaire non fibré et un autre qui contient des fibres de lin (Chafei, 2014). L'auteur a mentionné une diminution de 28% de la quantité de chaleur d'hydratation maximale pour le mortier renforcé par les fibres de lin ce qui confirme encore une fois la perturbation de l'hydratation cimentaire en présence des fibres.

Mélange	Chaleur d'hydratation maximale (J/g)
Cimentaire non fibré	309
Cimentaire + fibres de lin	221

Tableau I-21: Chaleurs d'hydratation maximales (Chafei, 2014)

4.2.1.3. Fissuration au jeune âge

Des fibres végétales peuvent être valorisées dans les composites cimentaires pour diminuer la sensibilité de ces derniers à la fissuration causée par le retrait plastique. Bien que le retrait reste présent, la fissuration est mieux contrôlée ; les fissures sont plus fines, moins longues et mieux distribuées.

Selon (Acker and Michaud-Poupardin, 2002), le retrait plastique est la contraction volumique du matériau qui a lieu après le séchage du béton frais. Ce retrait du béton à l'état de suspension plastique intervient lorsque le taux d'eau évaporé dépasse la quantité d'eau de ressuage. Dans le cas où le retrait est empêché, le phénomène induit des contraintes de traction dans la matrice et puisque la résistance à la traction du matériau cimentaire est faible au jeune âge, des fissures apparaissent à la surface du matériau (**Figure I-31**). Cette fissuration précoce peut conduire à terme à la dégradation des ouvrages notamment lorsqu'ils sont exposés à des cycles d'humidification/séchage ou de gel/dégel.

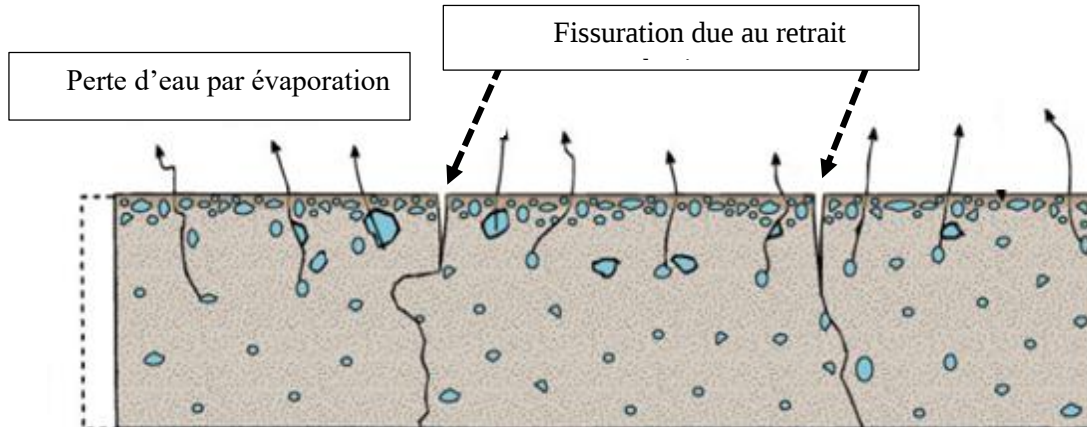


Figure I-31: Principe du retrait empêché (www.cptechcenter.org)

Une étude a été réalisée par (Le Hoang, 2013) sur l'effet de la variation des critères géométriques de fibres de lin sur le retrait au jeune âge du mortier cimentaire. Le **Tableau I-22** présente les résultats obtenus. L'auteur a noté une augmentation importante du niveau de stabilisation du retrait ainsi que du temps de stabilisation sur les composites fibrés en comparaison de la formulation témoin. Les vitesses de retrait des formulations avec des fibres de 10 mm sont plus faibles que celles des fibres plus longues. Plus l'ajout de fibres est important, plus le retrait augmente. L'auteur a attribué cette augmentation du retrait au changement de volume des fibres lors du relargage de l'eau quand le matériau se dessèche.

Formulation	Fibres de lin		Vitesse initiale du retrait ($\mu\text{m.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$)	Niveau de stabilisation ($\mu\text{m.m}^{-1}$)
	Taux (% vol)	L (mm)		
F0	0	-	20	19
F1	1	10	7	25
F2	1	30	17	40
F3	2	10	11	37
F4	2	30	43	48
F5	3	10	20	51
F6	3	30	13	44

Tableau I-22 : La vitesse initiale et le niveau de stabilisation du retrait (Le Hoang, 2013)

Les résultats disponibles dans la littérature sur le retrait plastique des composites cimentaires avec de fibres végétales sont contradictoires. La **Figure I-32** montre les valeurs maximales du retrait au jeune âge pour 4 formulations testées par (Booya et al., 2019). Les auteurs ont travaillé sur l'incorporation de plusieurs dosages des fibres de cellulose. Les auteurs ont observé une diminution du retrait pour toutes les formulations renforcées par les fibres végétales. Cette diminution a été attribuée au frottement entre la fibre et la matrice qui confine cette dernière et limite son mouvement.

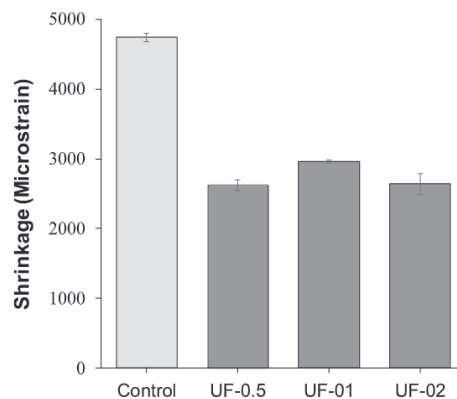


Figure I-32: Retrait au jeune âge du composite cimentaire avec fibres de celluloses (0,5 ; 1 et 2% en masse de liant, UF : Untraited Fibers) (Booya et al., 2019)

(Toledo Filho et al., 2005) ont réalisé des mesures de retrait libre et empêché. Les auteurs ont noté que l'ajout des fibres de sisal permet de limiter le retrait plastique et ce d'autant plus que le dosage en fibres est important. L'incorporation de 0,2% de fibres en volume diminue le retrait libre de 23 à 34%. Pour le retrait empêché, l'addition de sisal ou de coco permet de retarder l'apparition de la première fissure de 90 minutes par rapport à la matrice de référence (non fibrée) jusqu'à 180 minutes pour la matrice renforcée par ces 2 fibres. Ces résultats ont été interprétés par les auteurs comme une conséquence du module d'élasticité plus élevé des fibres ainsi qu'à l'effet de couture des fissures par les fibres qui permet de contrôler l'ouverture des fissures au jeune âge. Les auteurs ont montré aussi que le caractère poreux des fibres facilite l'autocicatrisation par le dépôt de nouveaux produits d'hydratation qui conduisent à la fermeture des fissures.

Pour mettre en évidence l'effet du dosage et de la longueur sur la sensibilité à la fissuration au jeune âge, (Juarez et al., 2015) ont travaillé sur l'addition de fibres de lin de plusieurs longueurs dans un composite cimentaire et à différents dosages. La **Figure I-33** permet une comparaison entre la formulation de référence et celles renforcées par les fibres de lin. Les auteurs ont noté que le dosage de

fibres de lin a une influence significative sur la réduction de la fissuration due au retrait plastique. Cependant, la longueur de fibres n'a pas un effet important sur l'évolution de la fissuration au jeune âge.

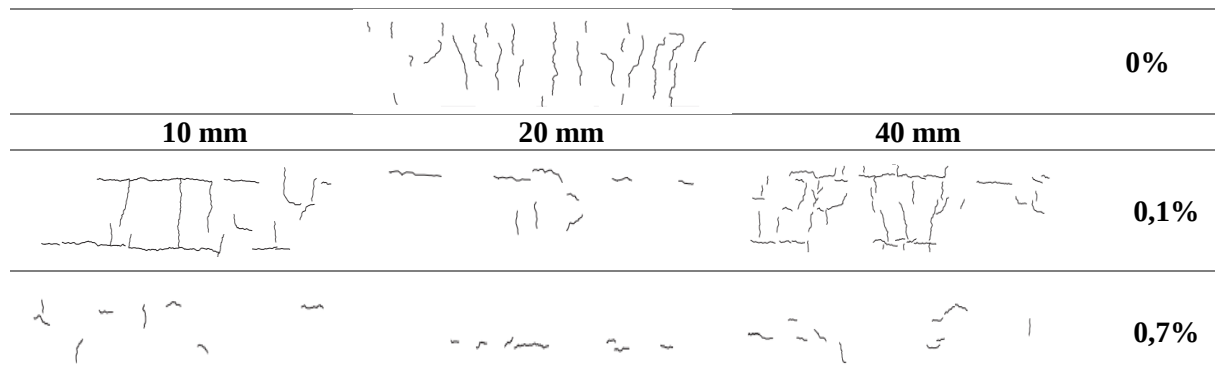


Figure I-33: Exemple de fissuration pour différentes fractions volumiques et longueurs de fibres de lin (Juarez et al., 2015)

4.2.2. Propriétés à l'état durci

L'ajout des fibres végétales dans le béton impacte les propriétés de ce dernier à l'état durci et ce en fonction de nombreux facteurs présentés dans le **Tableau I-23**.

Facteur	Variable
Types de fibres	Lin, chanvre, sisal, jute, bois
Géométrie des fibres	Longueur, diamètre, section
Morphologie des fibres	Unitaire, faisceaux, nœud
Surface des fibres	Rugosité
Propriétés de la matrice	Type de liant, nature et taille des granulats, adjuvants
Formulation du composite	Rapport eau/liant, dosage en fibres
Méthode de malaxage	Type de malaxeur, séquence d'introduction des constituants
Cure	Température, humidité

Tableau I-23: Les facteurs influents sur les propriétés des composites à l'état durci (Aziz, 1984) cité par (Magniont, 2010a)

4.2.2.1. Comportement en flexion

La littérature présente de nombreux travaux qui ont été réalisés sur les composites cimentaires renforcés par des fibres végétales et qui ont mis en évidence la modification du comportement mécanique en flexion du composite (Baley, 2004a; Chafei, 2014; Cid et al., 2020; Le Hoang, 2013; Li et al., 2004; Magniont, 2010a; Page, 2017a; Savastano et al., 2000, 2005; Sedan, 2007; Stanislas et al., 2021; Swift and Smith, 1979).

(Chafei, 2014) a étudié l'influence de l'incorporation des fibres de lin à un mortier cimentaire sur sa résistance à la flexion via des essais en flexion trois points. La **Figure I-34** montre les courbes charge-déplacement de MT (mortier témoin non fibré) et MFB (mortier avec fibres de lin brut). L'auteur a montré que l'ajout de 2 % de fibres de lin améliore le comportement en flexion du mortier avec, d'une part, une charge ultime 20% supérieure et, d'autre part, un comportement moins fragile compte tenu de la résistance résiduelle post fissuration rendue possible par la présence des fibres. Dans cette étude, l'auteur a illustré l'effet de pontage des fissures par les fibres visibles via la reprise de charge après l'amorce de la première fissure.

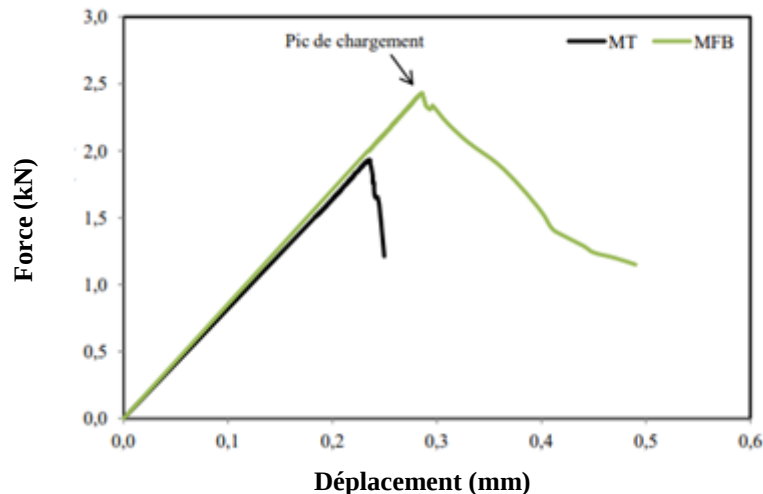


Figure I-34: Comportement en flexion trois points du mortier cimentaire non fibré, MT, et celui d'un mortier renforcé par un taux volumique de 2% de fibres de lin, MFT (Chafei, 2014)

Une autre étude a été réalisée par (Ruano et al., 2020) sur l'influence de l'incorporation de fibres de chanvre et de bagasse sur le comportement en flexion du composite cimentaire. Les auteurs ont utilisé un teneur en fibres de 0,8% (en masse de liant) avec une longueur de 6 mm. La

Figure I-35 montre une comparaison entre la formulation de référence et les deux formulations fibrées.

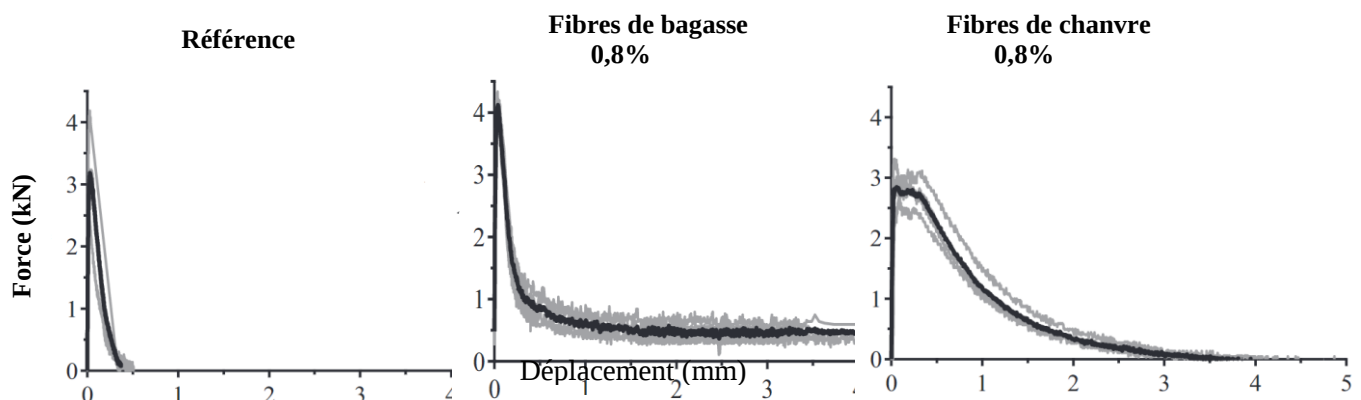


Figure I-35: Courbes Force – Déplacement en flexion 3 points (Ruano et al., 2020)

Les résultats ont montré que le mortier de référence a subi une chute brutale après l'initiation de la fissure. Cependant, pour les formulations renforcées par les fibres de chanvre, les fibres ont montré une capacité à conférer au composite une résistance résiduelle significative post pic. Cette capacité revient aux propriétés des fibres qui permettent d'assurer un bon ancrage avec la matrice. De plus, les auteurs ont réalisé des essais pour évaluer les propriétés d'arrachement fibres / matrice et ils ont observé une force d'arrachement très importante pour les fibres de chanvre par rapport aux fibres de bagasse ce qui explique la différence obtenue.

Pour mettre en évidence l'influence des caractéristiques géométrique des fibres de lin sur le comportement en flexion, (Le Hoang, 2013) a comparé le comportement post-fissuration entre une formulation cimentaire sans fibres et des formulations avec des dosages et des longueurs différentes (**Figure I-36**). Les résultats montrent qu'en traction par flexion, la réponse du composite dépend de la géométrie de la fibre.

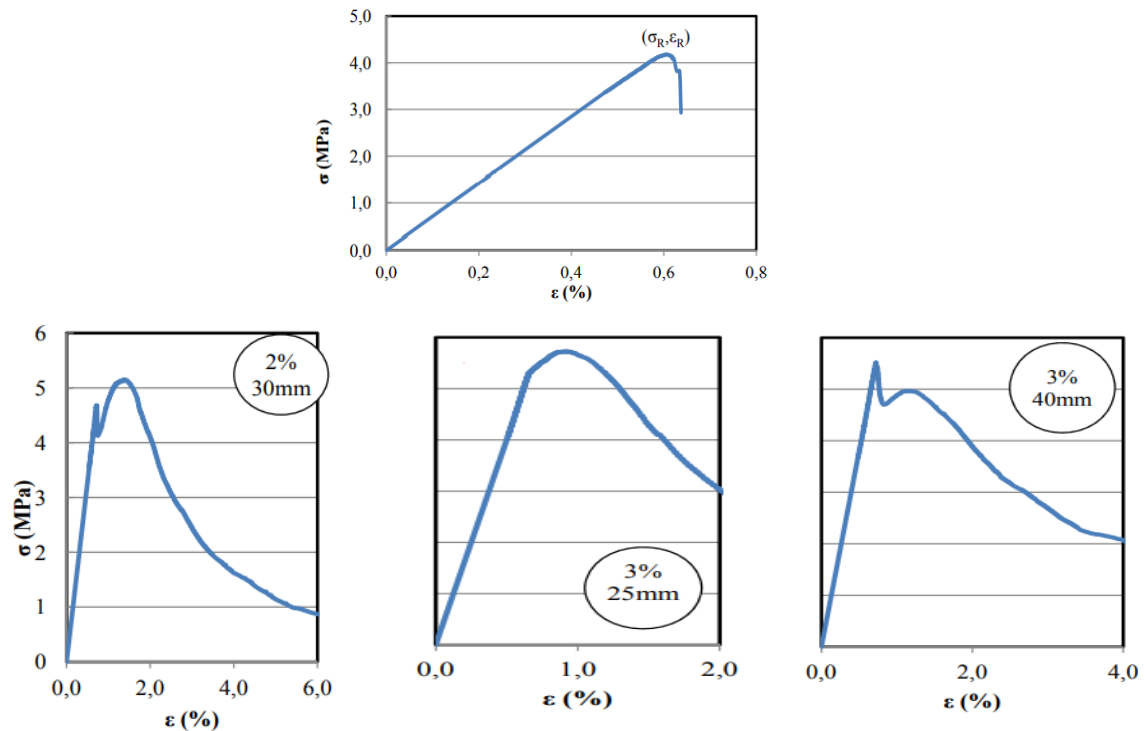


Figure I-36: Effet du dosage en fibre de lin et de la longueur de la fibre sur la contrainte en fonction de la déformation en traction par flexion (Le Hoang, 2013)

4.2.2.2. Comportement en compression

La résistance à la compression est parmi les caractéristiques essentielles des matériaux cimentaires durcis. L'étude bibliographique sur le comportement en compression des composites renforcés par des fibres végétales montre que les résultats obtenus sont contradictoires. Le travail réalisé par (Mansur and Aziz, 1982) a montré que la résistance en compression de composites incorporant des fibres de jute n'est pas sensible à l'ajout de ces fibres. Le comportement en compression reste quasiment le même malgré le changement du taux de fibres et de leur longueur.

(Le Hoang, 2013) a tiré de son étude des conclusions différentes. La **Figure I-37** montre la résistance en compression des composites renforcés par les fibres de lin à 7, 14 et 28 jours.

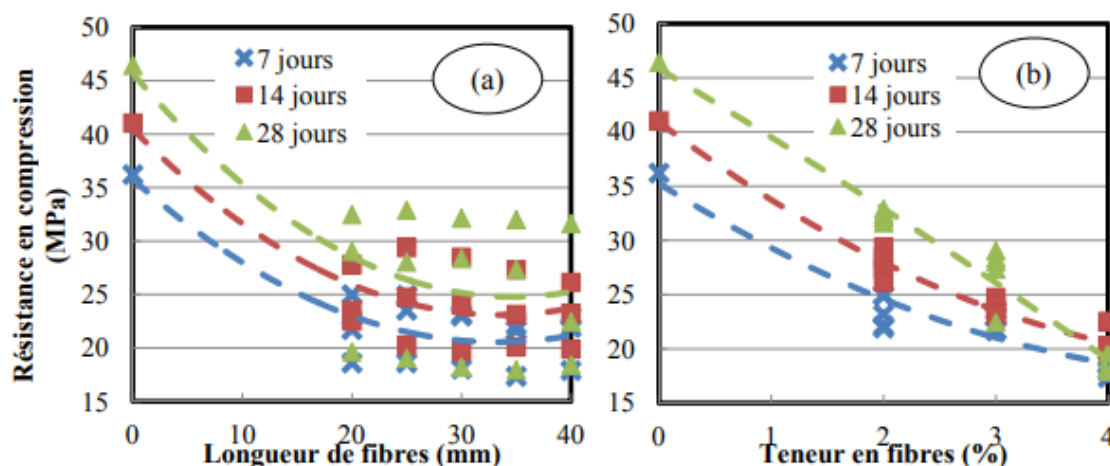


Figure I-37: Résistance en compression des composites en fonction de (a) la longueur de fibres et de (b) la teneur en fibres (Le Hoang, 2013)

Ces résultats montrent une baisse de la résistance avec la longueur et la teneur en fibres quel que soit l'âge des éprouvettes testées. Cette diminution de la résistance a été attribuée selon l'auteur à la probabilité de présence d'agglomérats de fibres en fonction de leur longueur. De même, l'augmentation du taux de fibres provoque une diminution continue de la résistance des composites. Pour 4% de fibres, par rapport au mortier de référence, la chute de la résistance en compression est plus de 50%.

D'autres études ont montré aussi la diminution de la résistance à la compression du composite cimentaire renforcés par des fibres végétales. (Kriker et al., 2005) a noté que 2% en volume de fibres de palmier dattier de 15 mm donne une résistance du composite égale à 90% de celle du béton non renforcé tandis que celle d'un béton renforcé par 3% de fibres de 60 mm ne représente plus qu'environ 55%. L'auteur attribue cette diminution à l'augmentation du nombre de défauts et à une répartition hétérogène des fibres dans le composite.

4.2.2.3. Ténacité et résistance aux impacts

La ténacité correspond à la capacité du matériau à absorber l'énergie d'un choc par exemple. C'est un paramètre important qu'il faut prendre en considération dans le cas des éléments de faible épaisseur comme les tuiles ou les panneaux de façades (Ramakrishna and Thirumalai, 2005a). Ce paramètre n'a pas été très étudié pour les mortiers et les bétons renforcés de fibres végétales. La ténacité peut être évaluée par un essai à l'impact.

Les performances mesurées peuvent être utilisées pour comparer différentes compositions de matériaux ou pour concevoir un système structural qui doit résister à certains types de charges d'impact. Cependant, les résultats de ces tests doivent être interprétés très soigneusement car ils dépendent d'un certain nombre de facteurs, notamment la géométrie de l'échantillon, les caractéristiques du chargement ainsi que l'expertise de l'opérateur (Gopalartnam and Shah, 1986; Ramakrishna and Thirumalai, 2005a).

(Buch et al., 1999) ont étudié l'effet de 0,15% de fibre de cellulose dans le composite cimentaire. Pour cette étude, les auteurs ont soumis une éprouvette de 15 cm de diamètre et 6,4 cm d'épaisseur à des chocs provoqués par la chute d'une masse de 4,5 kg d'une hauteur de 46 cm. A chaque fois, les auteurs ont relevé le nombre de coups nécessaires pour avoir une « fissure visible ». Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à l'impact de 40% pour le béton renforcé par les fibres de cellulose par rapport au béton non fibré. Cependant cette notion de « fissure visible » reste dépendante et peut être variable en fonction de l'opérateur.

(Ramakrishna and Thirumalai, 2005) ont défini un paramètre pour évaluer la ténacité du matériau : la résistance résiduelle d'impact comme précisé dans l'**Équation I-1**. L'apparition de la première fissure va être détectée visuellement et la rupture est marquée par la propagation de la fissure dans toute la surface de l'éprouvette. L'énergie absorbée est calculée en fonction du nombre de coups requis.

$$I_{rs} = \frac{\text{Energie absorbée à la rupture finale (Joule)}}{\text{Energie absorbée à l'apparition de la première fissure (Joule)}} \quad \text{Équation I-1}$$

La **Figure I-38** présente le rapport de la résistance résiduelle à l'impact qui est globalement améliorée pour les composites incorporant des fibres végétales.

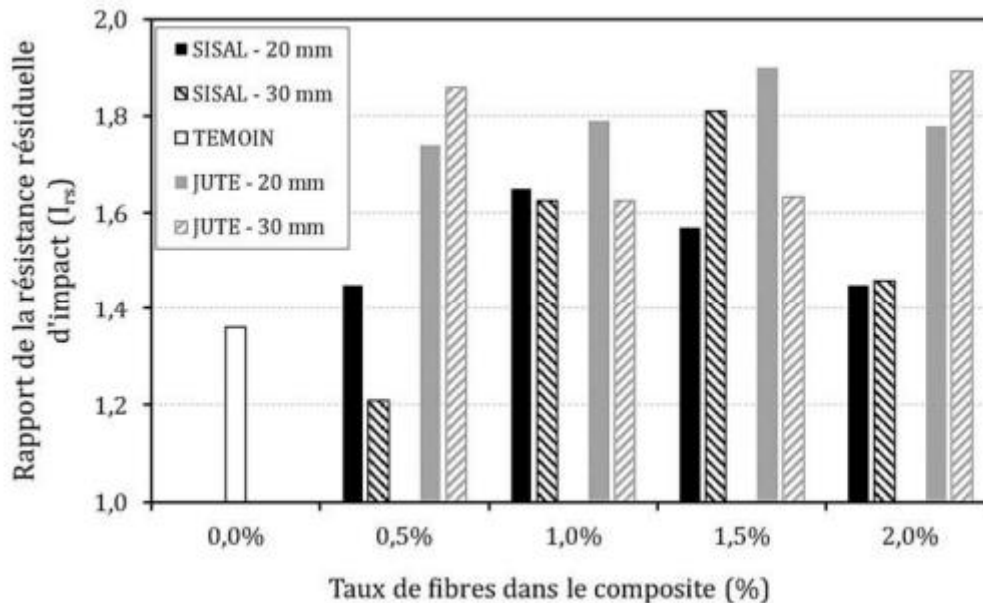


Figure I-38: Résistance résiduelle à l'impact sur des composites renforcés par des fibres de jute et de sisal (Ramakrishna and Thirumalai, 2005a)

Les auteurs ont noté qu'un taux de 1% ou 1,5% de fibres semble être optimal pour améliorer la ténacité des composites. Pour le sisal, cet optimum est de 1,5% pour une longueur de fibres de 20mm. Par contre, les valeurs obtenues ne suivent pas de logique particulière et fluctuent beaucoup ce qui rend difficile une conclusion sur l'influence de la longueur des fibres sur la ténacité.

4.3. Durabilité des composites cimentaires renforcés par des fibres végétales

Les résultats obtenus sur les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales sont encourageants mais beaucoup d'études ont montré des déficiences concernant la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire. Le liant cimentaire est un matériau qui est réputé pour sa forte alcalinité (PH >12,5), il contient des groupements hydroxyles qui se forment suite à l'hydratation et l'hydroxylation des silicates, des aluminates et des ferrites de calcium qui sont présents dans la matrice cimentaire.

4.3.1. Propriétés sur le long terme

Les différents travaux font état d'une chute de la ductilité des matériaux renforcés par des fibres végétales. Dans le travail de (Sedan, 2007), à l'issue de 12 mois de vieillissement naturel, le comportement mécanique des composites est modifié d'une manière considérable. La force provoquant la fissuration de l'éprouvette est relativement constante par rapport aux essais réalisés à 28 jours. Le comportement post pic est en revanche bien affecté et la résistance résiduelle post fissuration est quasi inexistante après vieillissement. Le matériau, quelle que soit sa composition, a subi une rupture brutale semblable à celle de la matrice non fibrée et aucun contrôle de rupture n'a été observé (**Figure I-39**).

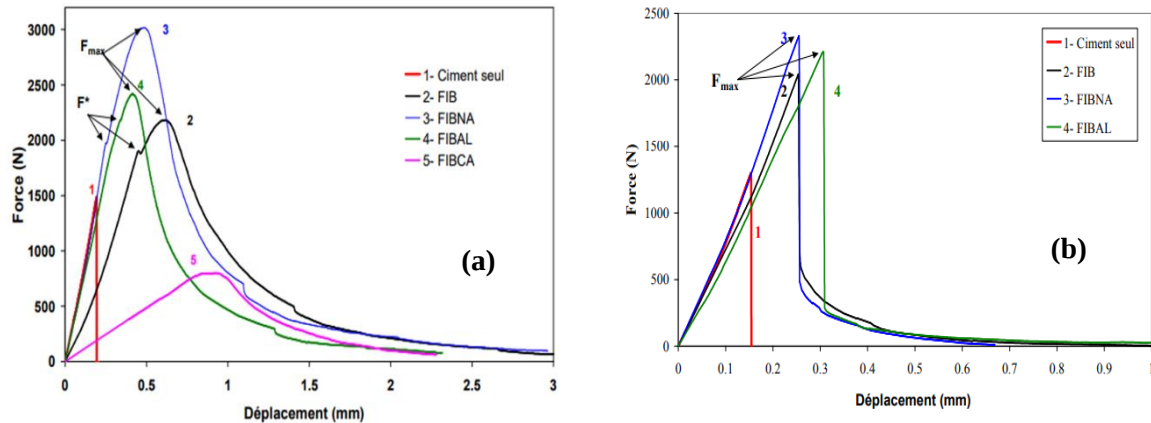


Figure I-39: Comportement mécanique en flexion 3 points d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres de chanvre brutes (FIB), et des fibres traitées avec une solution de soude (FIBNA) et de chlorure d'aluminium (FIBAL) à 28 jours (a) et après 12 mois de vieillissement naturel (b)

Des résultats similaires à ceux de Sedan ont été obtenus par (Mohr et al., 2005) qui ont travaillé sur les composites cimentaires renforcés par de la pâte de kraft de conifères. Les auteurs ont observé que les éprouvettes soumises à des cycles de saturation en eau/séchage présentent une perte de résistance maximale de 50 à 70% et une chute de 97 à 99% de la ténacité. La **Figure I-40** montre l'évolution du comportement en flexion d'échantillons soumis à plusieurs cycles de vieillissement.

Une autre étude réalisée par (Canovas et al., 1992) confirme l'observation décrite par (Mohr et al., 2005). Les auteurs ont observé une diminution notable de la résistance maximale en flexion. On peut observer cette diminution après 12 cycles de vieillissement. On observe également une diminution très importante de la ténacité du composite.

Une étude réalisée par (Tolêdo Filho et al., 2000) a montré qu'après 210 jours d'immersion des fibres de sisal et de coco dans une solution d'hydroxyde de calcium, une chute de résistance en traction des fibres a été observée. Les fibres de sisal ont perdu 34% de leurs résistance initiale et 59% pour les fibres de coco. La chute de résistance de ces fibres immergées dans de l'hydroxyde de sodium pendant 420 jours est égale respectivement à 72% et 61% (**Figure I-41**).

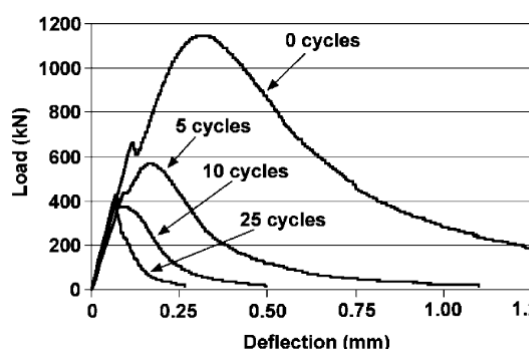


Figure I-40: Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion 3 points de ciment renforcé par des fibres de conifères (Mohr et al., 2005)

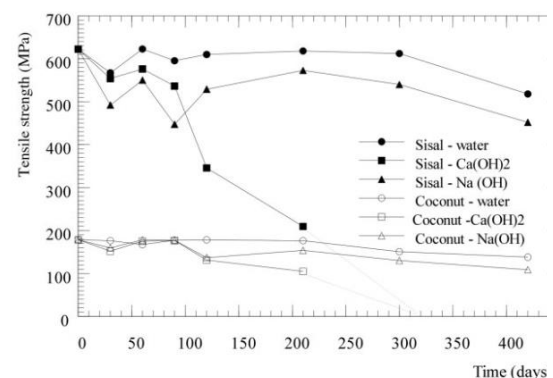


Figure I-41: Résistance à la traction des fibres de sisal et de coco en fonction de la durée d'immersion dans des solutions basiques et dans l'eau (Tolêdo Filho et al., 2000)

Toujours à propos de l'influence du milieu alcalin sur les propriétés des fibres végétales, (Juárez et al., 2007) ont montré que des fibres d'agave immergées dans une solution d'hydroxyde de calcium pendant 12 mois subissent une chute de 70% de leur résistance à la traction et de 80% de leur ductilité.

Selon (Tolêdo Filho et al., 2000), cette différence est attribuée à la cristallisation de la chaux dans les pores des fibres immergées dans la solution d'hydroxyde de calcium ce qui affecte leur résistance en traction. (Gram, 1983) a abouti à une conclusion similaire et il a expliqué qu'il existe une action spécifique des ions calcium lors de l'immersion de fibres dans des solutions d'hydroxyde de sodium ou de potassium. La perte de performance des fibres sur le long terme revient à la dissolution partielle ou totale de ses éléments chimiques en milieu alcalin et cette décomposition est conditionnée par 2 phénomènes : le décollement et l'hydrolyse alcaline.

Plusieurs auteurs (Bentur and Mindess, 2007; Tolêdo Filho et al., 2000) ont mentionné la modification du mode de rupture des fibres sur le long terme. Au jeune âge, la rupture se fait principalement par arrachement des fibres, mais après plusieurs cycles de vieillissement, le nombre de fibres cassées augmente et la proportion d'arrachement des fibres diminue.

L'adhérence entre la fibre et la matrice ne dépend pas seulement du milieu alcalin, plusieurs autres facteurs affectant l'interface fibre-matrice peuvent avoir une influence sur l'adhérence ainsi que sur les performances du composite. En effet, l'affinité des fibres végétales envers l'eau donne lieu au phénomène de gonflement/rétrécissement. Ce phénomène induit l'apparition de cavités ou de pores au niveau de l'interface fibre-matrice ce qui complique le transfert des contraintes de la matrice vers les fibres. Pour confirmer cette hypothèse, (Le Hoang, 2013) a réalisé des observations au MEB au niveau de l'interface fibre-matrice cimentaire à 28 jours (**Figure I-42**) qui montre qu'après relargage d'eau la fibre rétrécit et se déchausse de la matrice.

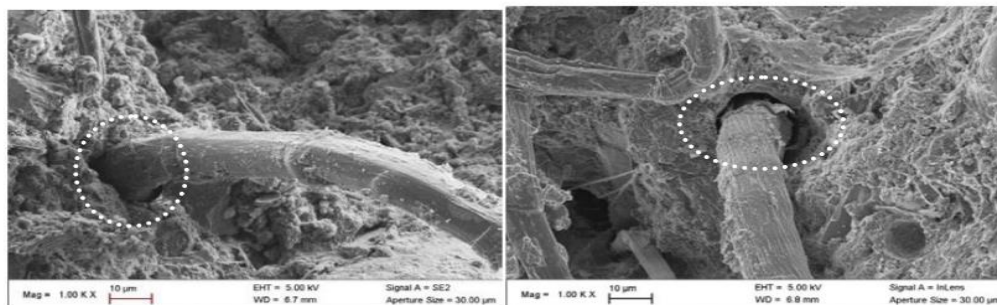


Figure I-42: Phénomène de déchaussement des fibres de lin au sein d'une matrice cimentaire (Le Hoang, 2013)

4.3.2. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales

Diverses études ont été faites dans le but d'empêcher la dégradation des fibres. On peut distinguer deux familles de solutions :

- modification des propriétés des fibres par imprégnation avec des agents bloquants ou traitants,
- utilisation de liant moins agressifs vis-à-vis des fibres végétales.

4.3.2.1. Traitement des fibres

De nombreuses études ont été menées afin de modifier les propriétés des fibres végétales avant de les incorporer dans les matrices minérales. La plupart des travaux visent à diminuer le caractère hydrophile de la particule végétale et inhiber le phénomène de relargage par la suite. Le but peut également être de modifier la surface de la fibre végétale pour assurer une meilleure adhérence fibre-matrice.

Comme les fibres végétales sont principalement composées de groupes hydroxyle, elles peuvent supporter des modifications chimiques qui permettent de nettoyer la surface des fibres, de réduire le coefficient d'absorption d'eau et d'augmenter la rugosité afin d'améliorer l'interface fibre/matrice en activant ou en introduisant de nouveaux groupes permettant de créer des croissances par épitaxie entre les fibres et la matrice (Arrakhiz et al., 2013; Chafei, 2014; Li et al., 2004). Pour cette raison, beaucoup de traitements chimiques ont été testés.

(Sedan, 2007) a étudié l'effet du traitement à l'hydroxyde de sodium sur les fibres de chanvre pour les incorporer par la suite dans une matrice cimentaire. Ce traitement a consisté à immerger les fibres de chanvre dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 6%. L'auteur a noté une amélioration de 39% de la résistance en flexion par rapport à un composite renforcé par des fibres de chanvre non traitées. Sedan a lié cette amélioration au fait que la solution de soude dégrade les impuretés et les cires à la surface de la fibre ce qui les rend plus homogène et par conséquent l'adhérence fibre-matrice devient meilleure.

(Chafei, 2014) a appliqué le même traitement que celui mis en œuvre par (Sedan, 2007) mais sur les fibres courtes de lin. Les résultats obtenus ont montré une diminution du coefficient d'absorption d'eau (-11%) par rapport aux fibres de lin non traitées. L'auteur a expliqué que cette diminution est la conséquence de la réduction du taux d'hémicelluloses. De plus, l'auteur a noté une amélioration de la résistance en flexion de 30% à 90 jours par rapport aux fibres de lin non traitées. Cette amélioration mécanique revient, selon l'auteur, à l'élimination d'une grande partie des pectines et lignines présentes entre les microfibrilles ce qui facilite le transfert des efforts entre elles.

Parmi les traitements chimiques des fibres, la plus basique est leur immersion dans de l'eau bouillante. Ce type de traitement a pour objectif d'ôter les extractibles par distillation dans l'eau pour assurer une compatibilité entre la fibre et la matrice (Chafei, 2014; Sellami et al., 2013). (Sellami et al., 2013) ont réalisé ce traitement sur les fibres de Diss avant de les incorporer dans la matrice cimentaire. Les auteurs ont constaté une amélioration significative de la résistance à la flexion du composite incorporant des fibres traitées en comparaison avec celui renforcé par des fibres brutes.

Pour éviter les traitements chimiques, des auteurs ont suggéré des cycles successifs de séchage et d'humidification comme moyen d'améliorer la stabilité dimensionnelle et thermique des fibres cellulosiques face à des conditions environnementales sévères dans les composites cimentaires. Ce genre de traitement permet aussi de diminuer le coefficient d'absorption d'eau des fibres et par conséquent d'améliorer l'adhérence fibre-matrice (Ballesteros et al., 2015; Claramunt et al., 2010a; Ferreira et al., 2017).

Il existe aussi d'autres types de traitement qui ont été réalisés afin d'améliorer les propriétés des fibres végétales d'une part et les caractéristiques des composites d'autre part. (Juárez et al., 2007) ont utilisé des agents protecteurs pour diminuer la sensibilité des fibres d'agave à l'environnement cimentaire. Les agents utilisés sont des substances organiques hydrophobes inactives pour le composite, économiques et faciles à mettre en œuvre : l'huile de lin, la paraffine, un mélange d'huile de lin/colophane et un mélange paraffine/colophane.

Le **Tableau I-24** présente le coefficient d'absorption d'eau des fibres d'agave après l'utilisation de ces agents hydrophobes.

Type du traitement	Coefficient d'absorption d'eau (%)
Aucun traitement	98
Huile de lin	64
Colophane	67
Paraffine/colophane	64

Tableau I-24: Le coefficient d'absorption d'eau des fibres d'agave après traitement par un agent hydrophobe (Juárez et al., 2007)

Les résultats obtenus montrent que les traitements réalisés sont efficaces pour diminuer le coefficient d'absorption d'eau. Le traitement à la paraffine a été le plus efficace et, à propos des propriétés mécaniques des fibres, les auteurs ont mentionné les points suivants :

- maintien de 53% de la résistance à la traction initiale de la fibre contre 31% pour les autres traitements,
- conservation de la ductilité des fibres (l'allongement à la rupture des fibres traitées par de la paraffine représente 47% de la valeur initiale tandis que celui des fibres traitées par les autres substances ne conservent qu'entre 17 et 27% de cette valeur).

4.3.2.2. Utilisation de liants moins agressifs vis-à-vis de la fibre végétale

Une des pistes suivies par les chercheurs aujourd'hui est d'utiliser une matrice plus compatible avec les fibres notamment en terme d'alcalinité. Dans ce but, plusieurs auteurs ont décidé de choisir de remplacer une partie du ciment par un liant pouzzolanique dans le but de diminuer l'alcalinité du composite.

Une étude a été réalisée par (Mohr et al., 2007) sur le remplacement du ciment par des liants alternatifs (fumée de silice, laitiers, cendres volantes et métakaolin) dans la formulation des composites fibrés. Les résultats ont montré qu'après 25 cycles d'immersion/séchage, le remplacement de 30% du ciment par de la fumée de silice a permis de conserver des résistances initiales. Pour les laitiers, des mauvais résultats ont été obtenus pour la résistance en flexion sauf dans le cas où 90% du ciment a été remplacé par le laitier. Pour les cendres volantes, les auteurs ont observé une forte diminution de la résistance en flexion après les cycles de vieillissement. Finalement, dans le cas des composites contenant du métakaolin, de bonnes résistances mécaniques ont été observées mais pour un taux de substitution minimum de 30%.

(Toledo Filho et al., 2009) ont suggéré de formuler une matrice sans hydroxyde de calcium. Cette matrice est composée de 50% de ciment, 50% de métakaolin et de briques calcinées. La réaction pouzzolanique qui en résulte permet la consommation de l'hydroxyde de calcium ce qui empêche le phénomène de minéralisation des fibres. Les résultats ont alors montré que la ductilité du composite est maintenue au cours du temps. Les **Figure I-43** et **Figure I-44** montrent que la résistance du composite augmente même avec le nombre de cycles de vieillissement, les auteurs attribuant ce phénomène aux réactions pouzzolaniques à long terme qui diminuent le taux des ions calcium et permettent une conservation de la bonne adhérence fibre-matrice.

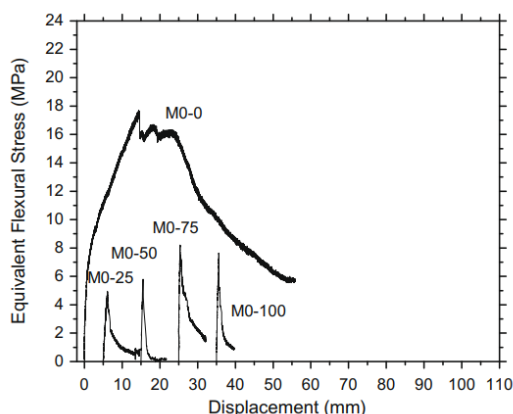


Figure I-43 : Comportement mécanique en flexion de composites à matrice cimentaire

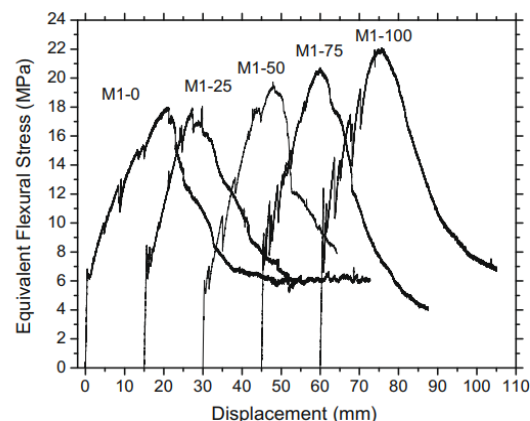


Figure I-44: Comportement en flexion de composites à matrice pouzzolanique sans hydroxyde de calcium au jeune âge et après des cycles de vieillissement accéléré

5. CONCLUSION ET STRATEGIE POUR LE TRAVAIL DE THESE

Dans cette partie, nous allons synthétiser ce que nous avons retenu de la revue bibliographique et présenter les orientations stratégiques qui en découlent en ce qui concerne les axes de notre étude.

5.1. Conclusion bibliographique

Dans la première partie de cette étude bibliographique, nous avons présenté la situation de la filière de la construction face aux enjeux du développement durable. Ce domaine est un secteur clé dans la lutte contre le réchauffement climatique et dans la transition énergétique. Pour cette raison, ce secteur doit agir prioritairement pour repenser et transformer son activité. Avec 42 % des consommations d'énergie et 25 % des émissions de gaz à effet de serre en France, la construction est le premier secteur consommateur d'énergie, de matières premières non renouvelables et le premier producteur de déchets. En effet, le poids des matériaux dans l'impact environnemental global des constructions devient de plus en plus lourd. Le développement de matériaux de construction alternatifs à faible coût environnemental est donc devenu une priorité. Les matières premières biosourcées comme les fibres naturelles et plus particulièrement celles qui sont d'origine végétale ont été identifiées comme ayant un fort potentiel pour le développement d'écomatériaux de construction.

Le deuxième volet de cette étude a consisté à présenter les fibres dans leur globalité puis les fibres végétales en particulier. Ces dernières proviennent d'une ressource naturelle, renouvelable et abondante. La littérature a montré que les fibres végétales telles que les fibres de lin et de chanvre ont des propriétés mécaniques spécifiques proches de celles de la fibre polypropylène ce qui les rendent de bons candidats pour entrer en compétition face à ces fibres. Cependant, les fibres végétales présentent également quelques faiblesses telles qu'une forte affinité envers l'eau et une forte dispersion des caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques.

Ensuite, nous avons présenté un état de l'art sur les propriétés des composites renforcés par les fibres végétales. L'association des fibres à un liant minéral tel que le ciment permet d'améliorer le comportement du composite vis-à-vis de la fissuration et de lui conférer une résistance résiduelle post fissuration qui fait défaut au matériau cimentaire de base réputé fragile. Cependant, l'incorporation des fibres végétales affecte la rhéologie du matériau en le déshydratant à cause de leur caractère hydrophile et en s'entremêlant avec une fâcheuse tendance à former des oursins. Ajuster le rapport E/L, utiliser du superplastifiant, prétraiter les fibres ou adapter une bonne méthode de malaxage sont parmi les solutions proposées par les chercheurs pour maîtriser la rhéologie du composite à l'état frais.

Au jeune âge, l'ajout des fibres permet de diminuer la sensibilité à la fissuration des composites cimentaires grâce à leur résistance à la traction qui est plus grande que celle du composite à l'état frais. A l'état durci, cette addition de fibres permet d'améliorer le comportement en flexion et d'augmenter la ténacité du matériau à court et à moyen terme mais pas sur le long terme. En effet, les fibres végétales perdent une grande partie de leur résistance et de leur ductilité en milieu alcalin par décomposition partielle de ses constituants chimiques. Il apparaît aussi que les ions calcium libérés durant l'hydratation cimentaire peuvent s'incruster dans les pores des fibres végétales ce qui provoque leur fragilisation, voire leur minéralisation et par conséquent la destruction de l'interface fibre-matrice. Le traitement des fibres par des agents hydrophobes ou bien substituer partiellement une partie du ciment par des additions pouzzolaniques de type fumées de silice ou métakaolin semblent être les mesures les plus efficaces pour améliorer la durabilité des fibres végétales car la matrice qui en résulte est moins agressive envers elles.

5.2. Démarche du travail de thèse

L'objectif de notre étude porte sur l'évaluation du potentiel des fibres végétales courtes comme renfort dans les mortiers à base de liants minéraux. L'application visée de ce mortier est de l'utiliser sous formes des couches minces pour des enduits intérieurs et extérieurs. Les performances des fibres

végétales dans le matériau seront analysées en comparaison avec celles obtenues par addition de fibres en polypropylène. Ces dernières sont disponibles sur le marché et sont prescrites pour réduire la sensibilité à la fissuration au jeune âge, améliorer la résistance aux chocs et le comportement au feu.

Pour les fibres végétales, nous nous sommes intéressés à 2 types de fibres, les fibres de lin et de chanvre. Ces fibres ont été retenues car elles sont cultivées et disponibles en France et que leur culture nécessite peu d'intrants. Elles peuvent constituer une revalorisation de coproduits agricoles (lin oléagineux par exemple) ou industriels (chanvre et lin textile). Enfin, leurs propriétés sont comparables à celles des fibres polypropylènes.

Au regard des résultats obtenus dans la littérature, une longueur de fibres de 12 mm a été choisie car cette fourchette de la longueur permet d'assurer une bonne performance des fibres dans le mortier (compromis rhéologie/adhérence). C'est également une longueur très présente dans l'utilisation actuelle des fibres polypropylènes. Pour le dosage des fibres, l'étude bibliographique a montré qu'un dosage qui varie entre 0,5% et 1% en masse de liant semble être suffisant pour améliorer les propriétés des composites tout en limitant les effets indésirables lors du malaxage.

Nous avons vu que les fibres végétales dans une matrice cimentaire ont une durabilité limitée. Pour cette raison, un traitement a été testé et il sera réalisé sur les fibres de lin. Le traitement choisi consiste à faire des cycles d'humidification/séchage dans un but de nettoyer leur surface et d'améliorer leurs propriétés physiques. Ce type de traitement, comparé aux agents chimiques, est en accord avec la volonté affichée de l'utilisation des fibres végétales dans un objectif de réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction.

Les fibres retenues seront incorporées dans des mortiers à base de 2 liants différents : un liant cimentaire (liant classique, le plus utilisé en génie civil) et un liant pouzzolanique (chaux-métakaolin). Ce dernier répond à deux objectifs : un meilleur bilan environnemental durant sa production et une solution pour améliorer la durabilité des fibres végétales.

Le **Tableau I-25** suivant résume le plan de travail suivi dans cette thèse.

Etape I : Contexte et état de l’art		
Situation écologique de la construction :	Les fibres un renfort dans les composites :	Composites fibrés :
Développement durable	Polypropylènes	Comportement et durabilité
Valorisation des écomatériaux	Végétales (lin et chanvre)	
Etape II : Matériaux et méthodes de caractérisation		
Les fibres employées	Caractérisation des fibres :	
Lin – Chanvre – Polypropylènes	Granulométrie - composition chimique - absorption d’eau - propriétés mécaniques	
Liants minéraux :	Caractérisation des mortiers :	
Ciment	Confection – Ouvrabilité – Hydratation – Flexion-Compression -Porosité	
Chaux/métakaolin		
Etape III: Formulations et caractérisation des mortiers à l’état frais		
Optimisation de la rhéologie :	Hydratation :	Variation dimensionnelle :
Temps d’écoulement - Etalement	Temps de début de prise Cinétique d’hydratation	Retrait plastique
Etape IV: Effet du renfort par des fibres végétales sur la sensibilité à la fissuration des mortiers au jeune âge		
Dispositif de mise en conditions sévères :	Méthodes adoptées	
Tunnel - Ventilateur chauffants	Moules prismatiques - Support brique adhérent Essais complémentaires : Perte en masse	
Etape V : Comportement des mortiers à l’état durci		
Résistance à l’impact :	Autres essais :	
Dispositif construit - méthode de mesure	Flexion - compression – porosité – MEB – Comportement face à des hautes températures	

Tableau I-25: Plan de travail de la thèse

Chapitre II. Matériaux et méthodes de caractérisation

1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, des fibres telles que les fibres synthétiques, métalliques et naturelles sont largement exploitées dans les composites cimentaires dans le but :

- d’améliorer la résistance à la fissuration du matériau au jeune âge,
- d’obtenir une meilleure résistance résiduelle post-fissuration,
- d’améliorer la résistance à l’impact,
- d’améliorer la tenue au feu (fibres polypropylènes).

Dans notre étude, deux types de fibres végétales (lin et chanvre) et une fibre synthétique (polypropylène) sont évaluées comment renfort d’un mortier.

Ce chapitre est dédié à la caractérisation des matériaux utilisés dans le composite final. Les méthodes mises en œuvre pour cette caractérisation seront préalablement présentées.

Ce chapitre est subdivisé en deux parties.

La première partie concerne la présentation des fibres employées (polypropylène, lin et chanvre) et les principales caractéristiques pouvant les discriminer (**Tableau II-1**).

Etude granulométrique	Longueur des fibres
Analyse chimique	Composition, teneur en matières organiques et minérales
Analyse physique	Cinétique d’absorption d’eau et taux de saturation en eau
Etude morphologique	Diamètre des fibres (MEB)
Etude mécanique	Résistance et module d’élasticité en traction directe
Analyse microstructurale	Etat de surface des fibres (MEB)

Tableau II-1: Principales caractéristiques des fibres utilisées

La deuxième partie détaille les différents constituants des mortiers cimentaires et pouzzolaniques ainsi que les méthodes de caractérisation qui seront appliquées pour étudier le comportement des composites (**Tableau II-2**).

Rhéologie	Temps d’écoulement et étalement
Temps de prise	Temps de prise et chaleur d’hydratation
Résistances mécaniques	Résistance en compression et en traction par flexion
Caractérisation physique	Porosité à l’eau
Caractérisation microstructurale	Etat de l’interface fibre/matrice

Tableau II-2: Méthodes de caractérisation des mortiers

2. LES FIBRES EMPLOYEES

2.1. Les fibres polypropylènes

Les fibres polypropylènes (**P**) utilisées dans cette étude sont de marque MAPEPLUS et sont obtenues par extrusion pour une utilisation dans les bétons et mortiers. Elles sont illustrées à la (**Figure II-1**). D’après la fiche technique, ces fibres sont incorporées dans le matériau pour limiter les fissures dues au retrait, augmenter la résistance à l’abrasion, aux chocs, au feu, au gel et pour améliorer les résistances mécaniques aux jeunes âges. Les effets d’un tel renfort sont bien renseignés dans la littérature (Banthia and Sheng, 1996; Ezziane et al., 2015; Shen et al., 2020).



Figure II-1: Les fibres polypropylènes

Les caractéristiques des fibres polypropylènes mises en œuvre (*données fournisseur : MAPET*) sont détaillées dans le **Tableau II-3**.

Nature	100 % polypropylène mono filamentaire
Diamètre (μm)	32
Longueur (mm)	12
Masse volumique (g.cm^{-3})	0,91
Point de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	160
Absorption d'eau (%)	0
Dosage optimal	100 g pour 35 kg de liant

Tableau II-3: Les caractéristiques des fibres polypropylènes

2.2. Les fibres végétales

Deux fibres naturelles d'origine végétale ont été étudiées : lin (**L**) et chanvre (**C**). Ce sont des fibres extraites de la tige de la plante. Ces deux types de fibres ont été utilisées après une découpe pour ajuster leurs longueurs. L'effet d'un prétraitement (10 cycles d'humidification/séchage) a été testé sur les fibres de lin uniquement (**section 3.2**).

2.2.1. Fibres de lin

Les fibres de lin et les informations sur les étapes de production ont été fournies par le groupe DEPESTELE. Il s'agit de fibres courtes de longueur 12 mm (**Figure II-2**).

2.2.1.1. La production

Le lin est semé du 1^{er} mars au 15 avril. Le lin pousse en « 100 jours ». Six semaines après le semis, la plante atteint une hauteur de 10 à 15 cm. Une fois que les 6 semaines sont passées, cette taille montera jusqu'à 70-80 cm au bout de quinze jours.

La floraison (vers le 15 juin) dure environ une semaine. C'est alors qu'intervient cette magnifique couleur bleue. Couleur éphémère car elle disparaîtra une semaine plus tard. Les fibres vont alors atteindre leur longueur maximale, les graines vont se former au cours des 15 jours suivants dans les capsules.

Lors de la récolte, la plante entière (racine comprise) est arrachée. Le lin est une excellente tête d'assolement qui favorise la culture de céréales qui suivra. Elle exige cependant une rotation de 5 à 6 années, le rouissage au champ pouvant provoquer des maladies en cas de retour trop rapide de la culture du lin sur la terre.

2.2.1.2. *Le rouissage : première étape de transformation des pailles de lin*

La période de rouissage débute à la maturité du lin, lorsqu'il est arraché et couché en andains. Cette transformation correspond à la dissociation des parties fibreuses par décomposition. Celle-ci se fait grâce à l'élimination de la pectine ; substance qui soude les fibres de la partie ligneuse. Le travail des arracheuses est suivi par celui des écapsuleuses-batteuses. Celles-ci reprennent les andains afin de récupérer les graines.

Il existe deux types de rouissage ; un rouissage dit à l'eau et un rouissage dit à terre (dans les champs). Le premier était réputé pour donner des toiles plus blanches. Le rouissage à terre est la technique la plus utilisée de nos jours. On étend, après avoir coupé le lin, les tiges sur le sol pendant quelques semaines. Mais cette opération reste sous le joug des conditions climatiques.

2.2.1.3. *Le teillage*

Le teillage correspond à la séparation par broyage et par battage de la tige. C'est à ce moment que sont récupérées les graines de lin. Les parties ligneuses de la plante sont nommées anas. Cette opération est effectuée tout au long de l'année dans des usines de teillage.

2.2.1.4. *Le peignage*

Le lin provenant du teillage est alors préparé pour être filé, les fibres sont ainsi divisées afin de les homogénéiser.

Les peigneuses sont parés d'aiguilles de plus en plus fines, ainsi les fibres de lin seront séparées de plus en plus finement. On peigne d'abord les pieds puis les têtes. Après cette différenciation, une pince vient saisir ces fibres pour les déposer de manière à ce qu'elles se chevauchent sur une étaleuse. C'est de cette manière que se forme un ruban de lin peigné, de grande longueur.

2.2.1.5. *La découpe*

Après le peignage, l'alignement du ruban de lin a eu lieu pour séparer les faisceaux de fibres. Ensuite, les fibres courtes de 12 mm de la longueur (**Figure II-2**) sont obtenues par découpe mécanique.



Figure II-2: Les fibres de lin

2.2.2. **Fibres de chanvre**

Les fibres de chanvre ont été fournies par la chanvrière de l'Aube. Les fibres sont issues de paille de chanvre industriel non roui. Elles ont été obtenues par défibrage mécanique et ont été reçues sous forme d'une filasse. Nous avons procédé à un découpage manuel visant 12 mm de longueur (**Figure II-4**).



Figure II-3: Filasse de chanvre



Figure II-4: Fibres coupées

3. CARACTERISATION DES FIBRES VEGETALES

3.1. Etude granulométrique

3.1.1. Dispositif expérimental

Les caractéristiques géométriques de la fibre, en particulier sa longueur, sont un facteur important qui affecte le comportement des composites à l'état frais et à l'état durci (Bertelsen et al., 2019a; Le Hoang, 2013). C'est pourquoi la longueur de chaque type de fibre doit être déterminée. La distribution des longueurs des fibres a été déterminée en utilisant 2 méthodes différentes (**Tableau II-4**).

Méthode de mesure	Description
Numérique via Image J	Le logiciel permet de calculer les longueurs de fibres en utilisant les pixels de l'image
Manuelle	Avec une simple règle graduée, on mesure la longueur de chaque fibre

Tableau II-4: Les méthodes de mesure de la longueur des fibres

L'étude a été réalisée sur environ 800 fibres de chaque type afin d'avoir des résultats représentatifs. Le protocole utilisé pour déterminer la répartition de la longueur des fibres est schématisé dans la **Figure II-5**.

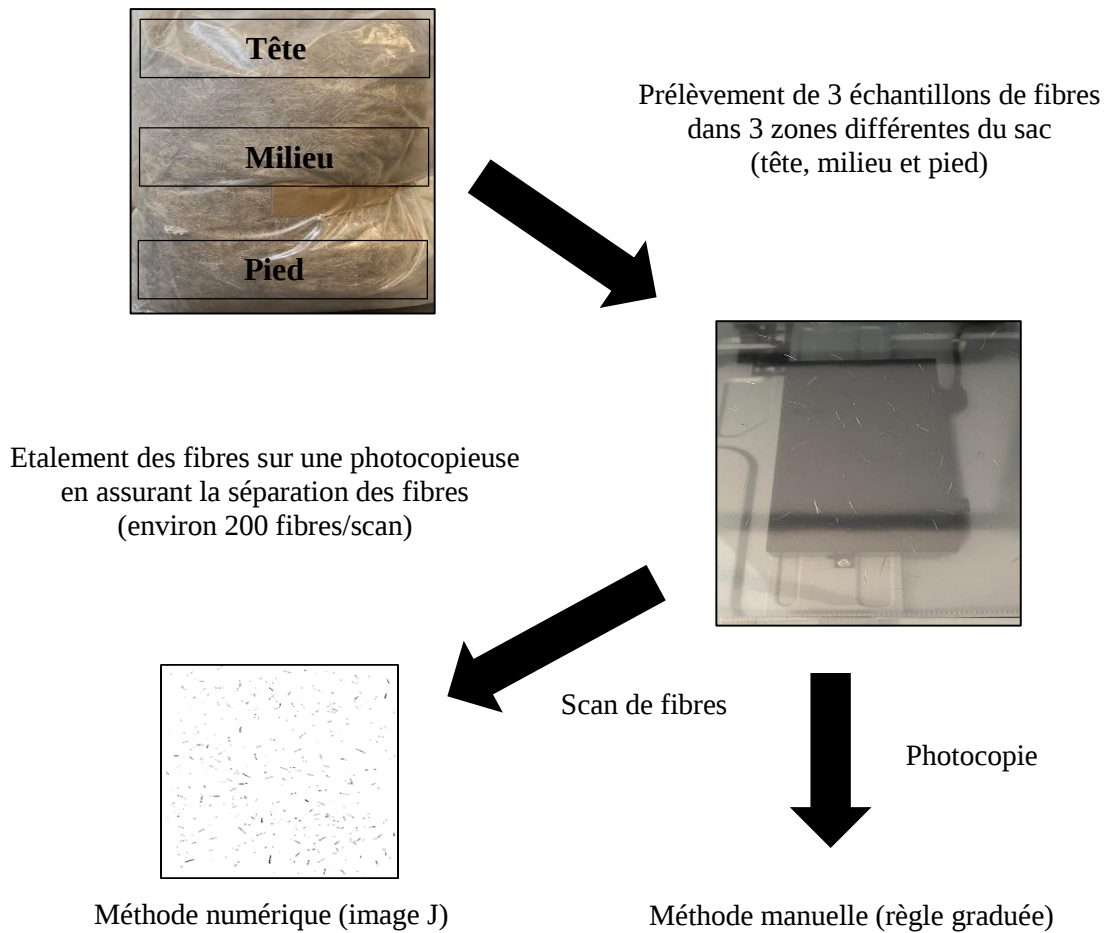


Figure II-5: Le protocole de mesure de la longueur des fibres

3.1.2. Résultats obtenus

La **Figure II-6** et la **Figure II-7** représentent le pourcentage des fibres de lin et chanvre en fonction de leur longueur.

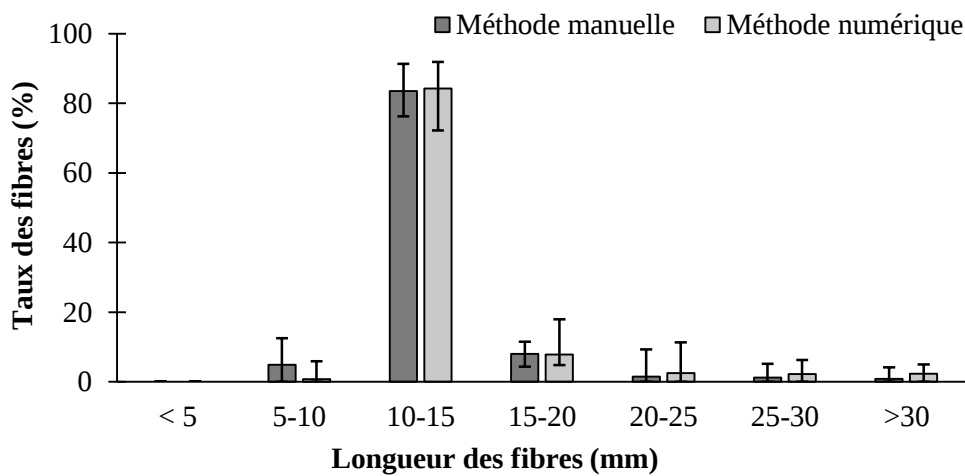


Figure II-6: Distribution de la longueur des fibres de lin

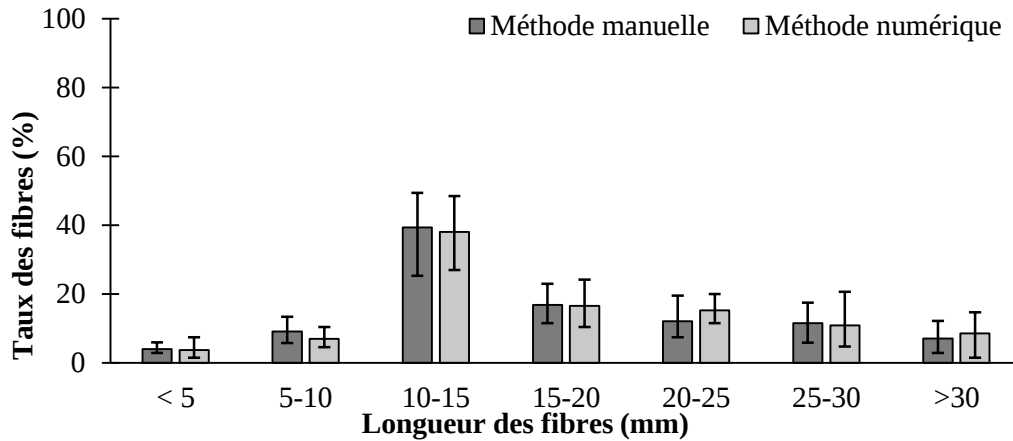


Figure II-7: Distribution de la longueur des fibres de chanvre

Les deux méthodes de caractérisation de longueur des fibres conduisent à des résultats similaires.

L'intervalle de longueur qui présente le plus haut taux de fibres (lin – 80%, chanvre – 40%) est 10 - 15 mm ce qui est en accord avec les caractéristiques de notre cahier de charge. La référence en polypropylène à une longueur de 12 mm. La différence entre les fibres de lin et de chanvre pourra être attribuée à la méthode de découpe de chaque type des fibres. En effet, les fibres de lin ont été découpées mécaniquement par les moyens industriels du fournisseur ce qui n'est pas le cas des fibres de chanvre reçues sous forme de filasse et coupées manuellement par nos soins, avec des ciseaux.

On constate une plus grande homogénéité de longueur pour le lin d'une part et la présence d'une quantité importante (40 à 50%) de fibres longues pour le chanvre.

3.2. Prétraitement des fibres de lin par humidification/séchage

L'étude de l'impact d'un prétraitement a été faite uniquement sur le lin. Une partie des fibres de lin a été soumise à des cycles humidification/séchage. Ce type de prétraitement permet de diminuer le coefficient d'absorption d'eau par les fibres et d'améliorer l'adhérence entre la fibre et la matrice (Ballesteros et al., 2015; Claramunt et al., 2010b; Ferreira et al., 2017).

Le prétraitement a été réalisé en se référant au travail de (Ferreira et al., 2017). La méthode consiste à faire dix cycles successifs de 3 h d'humidification suivis chacun par 20 h de séchage à l'étuve à 80°C comme schématisé dans la **Figure II-8**.



Figure II-8: Méthode de prétraitement testée sur les fibres de lin

3.3. Composition chimique

3.3.1. Dispositif expérimental

Les fibres végétales comme le lin et le chanvre sont essentiellement composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine dont les dosages massiques dépendent de la variété de la plante et de sa culture (Bourmaud et al., 2013).

Les fractions massiques de cellulose (**C**), de lignine (**L**) et d'hémicellulose (**Hc**) des fibres de lin et de chanvre ont été déterminées en utilisant la méthode de Van Soest et Wine gracieusement mise à disposition par le laboratoire Agromat à Tarbes. Cette méthode a été déjà mise en œuvre par (Chafei, 2014; Magniont, 2010a; Page, 2017b). Egalement appelée dosage ADF-NDF (pour « Acid Detergent Fiber - Neutral Detergent Fiber »), elle consiste à effectuer des attaques successives à l'aide de solutions détergentes spécifiques qui dégradent sélectivement certains composants de l'échantillon.

Le principe de cette méthode est illustré sur la **Figure II-9**.

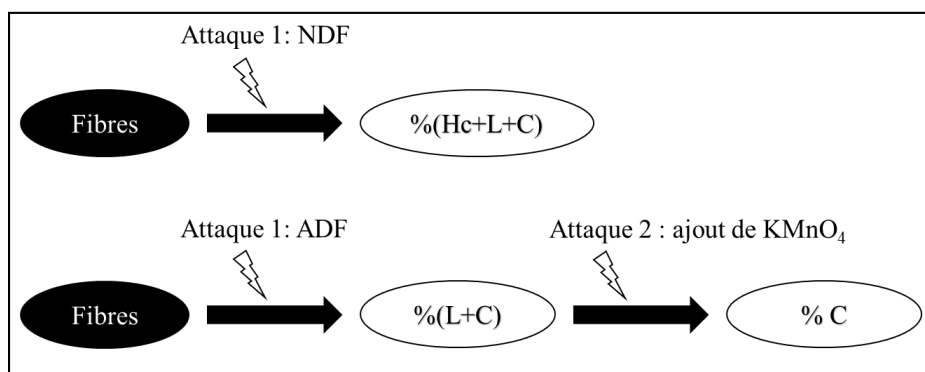


Figure II-9: Le principe de la méthode Van Soest et Wine

Les fibres sont préalablement réduites en particules de dimension inférieure à 1 mm au moyen d'un broyeur à couteaux afin de s'assurer de leur homogénéité. Les mesures sont réalisées sur deux échantillons d'environ un gramme. Une fois, les attaques NDF et ADF sont finies, des traces de matières minérales peuvent tout de même persister. Afin de les estimer quantitativement, les frittés sont calcinés dans un four à cendres à 550 °C jusqu'à masse constante.

3.3.2. Résultats obtenus

Le **Tableau II-5** présente le dosage de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et des minéraux des fibres végétales de lin brut, de lin traité et de chanvre utilisées dans notre travail. La teneur de chaque élément est exprimée en pourcentage massique par rapport à la matière sèche.

	Lin brut	Lin traité	Chanvre
Cellulose	79,6 ± 0,1	83,6 ± 0,3	79,8 ± 0,3
Hémicellulose	8,8 ± 0,1	8,8 ± 0,4	9,6 ± 0,1
Lignine	3,7 ± 0,1	6,7 ± 0,6	1,8 ± 0,1
Minéraux	1,2 ± 0,2	0,3 ± 0,0	1,1 ± 0,2

Tableau II-5: Composition chimique des fibres (teneurs exprimées en % de leur masse sèche)

Le taux de cellulose est d'environ 80% (par rapport à la masse sèche des fibres) pour les fibres de lin brut, 84% pour celles de lin traité et 80% pour celles de chanvre ; les dosages en hémicellulose sont équivalents pour les fibres de lin brut et traité (environ 9%) et de 10% pour les fibres de chanvre. Le taux de lignine est d'environ 4% pour les fibres de lin brut, 6% pour celles de lin traité et 2% pour les fibres de chanvre. Les dosages en matières minérales sont équivalents entre les fibres de lin brut et celles

de chanvre (1,2%). Cependant, on peut noter une diminution de la teneur des minéraux pour les fibres de lin traité (0,3 %)

Les composés hydrosolubles tels que les pectines ne sont pas dosés par cette méthode mais on pourra les calculer en utilisant l'**Équation II-1**.

$$\% \text{ des hydrosolubles} = 100 - (\% C + \% Hc + \% L) \quad \text{Équation II-1}$$

Le **Tableau II-6** montre la teneur en hydrosolubles de chaque fibre étudiée.

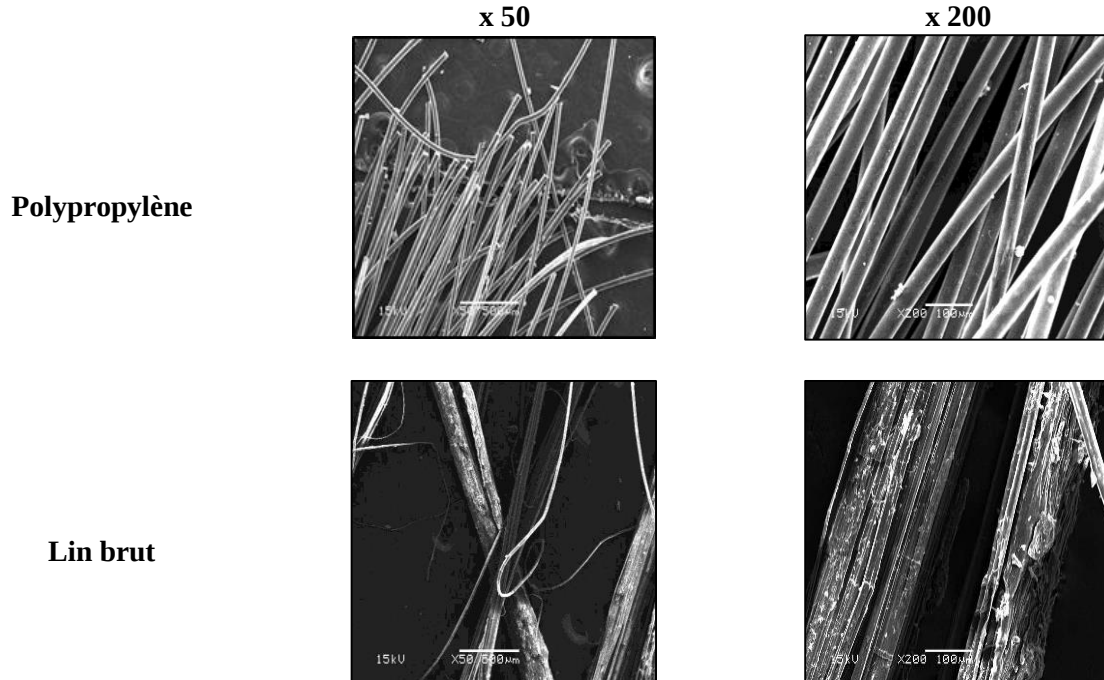
	Lin brut	Lin traité	Chanvre
Hydrosolubles	7,9	0,9	8,8

Tableau II-6: Teneur en hydrosolubles des fibres (teneurs exprimées en % de leur masse sèche)

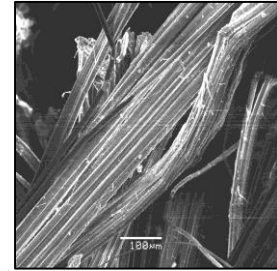
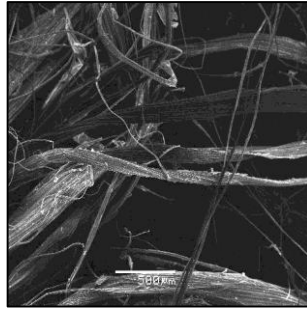
On peut remarquer que les hydrosolubles représentent 8% de la masse sèche des fibres de lin brut contre 1% pour celles de lin traité et 9% pour les fibres de chanvre. La différence entre les fibres de lin brut et traité montre que le traitement effectué sur les fibres de lin permet de nettoyer la surface des fibres et de réduire le taux des hydrosolubles.

3.4. Morphologie des fibres

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet d'obtenir des images de la structure des matériaux avec des grossissements de $\times 10$ à $\times 500000$. Le MEB utilisé dans ce travail est un appareil de type JEOL JSM-6380 LV couplé à un détecteur Bruker XFlash 6/30



Lin traité



Chanvre

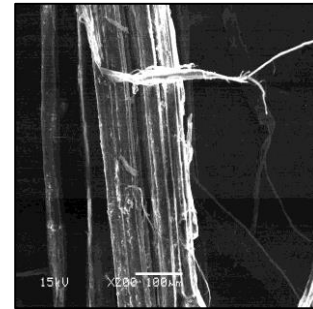
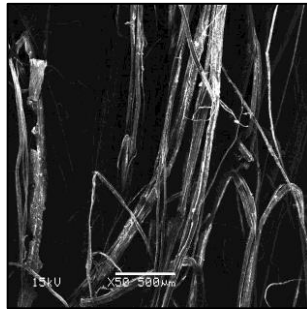


Figure II-10: Analyse morphologique des fibres avec deux grossissements

Avec l'analyse MEB réalisée (**Figure II-10**) nous avons observé les points suivants.

- les fibres polypropylènes sont caractérisées par une surface homogène et propre,
- les fibres de lin brut et de chanvre sont couvertes d'une couche non uniforme et non homogène. Cette couche correspond aux différents types d'impuretés qui sont fixées sur la paroi de la fibre (graisses, pectines),
- une différence est bien visible entre la surface de la fibre de lin brut et celle du lin traité. On peut remarquer que la surface d'une fibre de lin traité est plus propre, plus homogène que celle de la fibre brute. Cette homogénéité au niveau de la surface est liée à l'élimination des hydrosolubles. Les images obtenues sont bien cohérentes avec le bilan chimique du lin traité qui a montré une réduction de la quantité des extractibles,
- les fibres végétales sont présentes sous forme de faisceaux ou de fibres unitaires ce qui induit une variabilité du diamètre des fibres. Les fibres polypropylènes sont présentées sous forme de fibre unifilaire.

3.5. Cinétique d'absorption d'eau et taux de saturation en eau

Le coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales de lin et chanvre a été déterminé selon la méthode décrite par (Chafei, 2014; Magniont, 2010a). Cette méthode consiste à sécher quatre échantillons de fibres d'environ 1 g chacun dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

Les fibres sont par la suite immergées dans l'eau (**Figure II-11**) pendant 5, 15, 30 minutes, 1 heure, 2 heures et 24 heures. Leurs masses sont déterminées pour chaque échéance après séchage superficiel à l'aide du papier absorbant afin d'enlever l'eau présente à leur surface (**Figure II-12**). Les pesées ont été réalisées à l'aide d'une balance avec une précision de 0.001g.



Figure II-11: Immersion des fibres dans l'eau



Figure II-12: Les fibres après séchage superficiel

Le coefficient d'absorption d'eau des fibres est déterminé par l'Équation II-2 :

$$\text{Coefficient d'absorption d'eau (\%)} = \frac{\text{masse saturée} - \text{masse sèche}}{\text{masse sèche}} \times 100 \quad \text{Équation II-2}$$

La **Figure II-13** montre le coefficient d'absorption d'eau des fibres après 24 heures d'immersion, temps suffisamment long pour assurer une saturation en eau (Chafei, 2014). On peut constater que les fibres de lin brut, de lin traité et de chanvre ont absorbé une masse d'eau importante dont la quantité a dépassé la masse propre de chaque fibre. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études (Chafei, 2014; Magniont, 2010a; Page, 2017b). Cette absorption d'eau est attribuée au phénomène de fixation des molécules d'eau avec les liaisons hydrogène présentes dans les polysaccharides présents dans les fibres (hémicelluloses, pectines).

Les valeurs moyennes d'absorption à 24 heures sont les suivantes :

- les fibres de lin brut : 148%,
- les fibres de lin traité : 124%,
- les fibres de chanvre : 178%.

Pour les fibres de lin traité, une diminution de 25% du coefficient d'absorption d'eau a été observée par rapport aux fibres de lin brut. Cette diminution peut être liée à l'amélioration de l'état de surface de la fibre grâce à la réduction du taux des pectines qui contribuent à piéger les molécules d'eau via ses liaisons hydrogène. Ces résultats sont cohérents avec le bilan chimique obtenu ainsi qu'avec l'analyse microscopique réalisée sur les fibres.

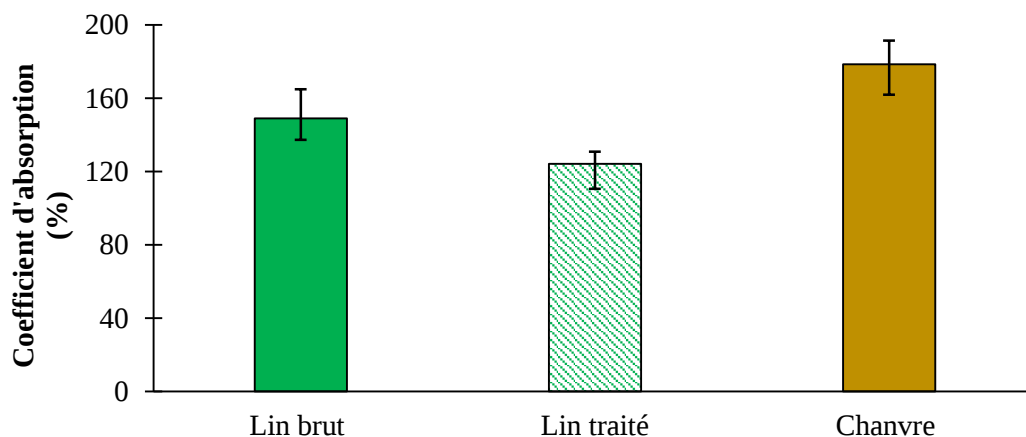


Figure II-13: Le coefficient d'absorption d'eau des fibres après 24 h d'immersion

Nous avons également déterminé la cinétique d'absorption d'eau pour chaque type de fibres (**Figure II-14**). On peut constater que les fibres de chanvre se saturent plus rapidement que les fibres de lin qu'elles soient brutes ou traitées. Le coefficient d'absorption d'eau pour les fibres de chanvre après 5 min d'immersion est presque équivalent à celui après 24 heures tandis que pour les fibres de lin, la saturation n'intervient qu'après 30 minutes d'immersion. On a remarqué aussi que le traitement effectué sur les fibres de lin n'a pas affecté la cinétique d'absorption d'eau.

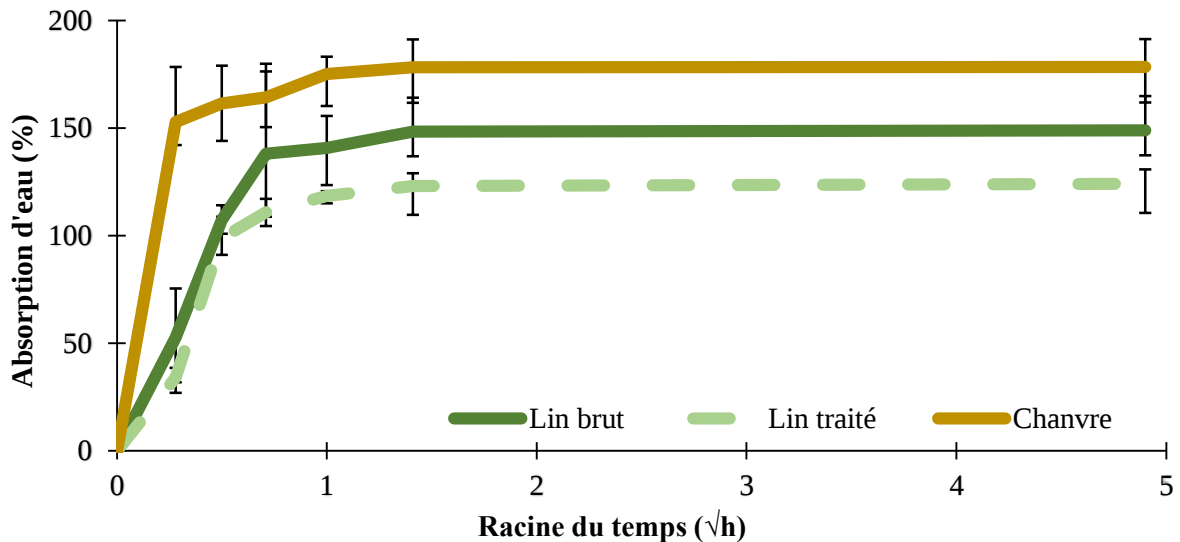


Figure II-14: La cinétique d'absorption d'eau des fibres

3.6. Résistance en traction

3.6.1. Dispositif expérimental

L'évaluation de la résistance à la traction des fibres de lin, de chanvre et de polypropylène a été réalisée sur 30 échantillons de chaque type de fibres à l'aide du dispositif de test Diastron gracieusement mis à disposition par le laboratoire LGP à l'ENIT de Tarbes. Le protocole expérimental est décrit à la **Figure II-15**.

La fibre collée sur les tablettes plastiques est positionnée dans les mors rotatifs du module et maintenue en position par un système pneumatique. Le diamètre de la fibre est déterminé grâce à un système laser haute précision qui permet de scanner la fibre sur toute sa circonférence localement et à plusieurs positions sur sa longueur. Les valeurs de diamètre mesurées sont récupérées lorsque la fibre fait un tour complet autour de son axe à l'aide du logiciel UV Win.

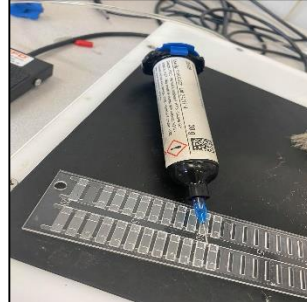
Ce dispositif est développé spécifiquement pour le test des fibres naturelles (Grégoire, 2021). Il est composé d'une cellule de charge de capacité 20 N ainsi que d'un moteur qui permet de contrôler le déplacement avec une précision de 1 μ m. L'essai a été réalisé avec une vitesse de déplacement imposée de 1 mm/min selon la norme NF T-25-501-2. Cette valeur a été déjà adoptée dans plusieurs travaux (Gourier, 2016; Grégoire, 2021; Page, 2017b).

La **Figure II-16** montre un exemple de courbe contrainte-déformation obtenue avec la fibre de lin en prenant en compte sa section moyenne via l'essai LEX.

Extraction des fibres unitaires
des faisceaux de fibres



Collage des fibres
avec un adhésif polymérisant
aux rayonnements ultra-violets



Mesure du diamètre des fibres
par ombroscopie en utilisant le dispositif
Fibre Dimensional Analysis System
(FDAS) intégré au banc d'essai



Test en traction directe
en utilisant un banc haute précision
(dispositif Lex)
avec une capacité de 20 N

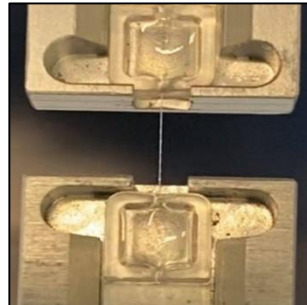


Figure II-15: Le protocole de la mesure de la résistance en traction des fibres

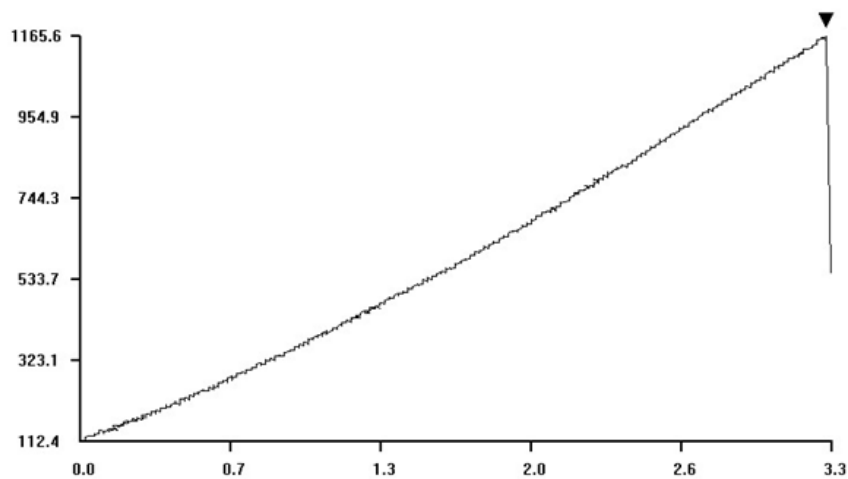


Figure II-16: Contrainte en fonction de la déformation en traction directe - cas d'une fibre de lin

3.6.2. Résultats obtenus

Le **Tableau II-7** présente la résistance et le module d'élasticité en traction directe de fibres de lin brut, de lin traité, de chanvre et du polypropylène. Le module d'élasticité a été déterminé en calculant la pente de la partie linéaire de la courbe obtenue via l'essai de traction. A titre de comparaison, les fibres métalliques les plus utilisées comme renfort des matériaux à base cimentaire ont une résistance à la traction et un module d'élasticité de l'ordre de 1270 MPa et 200 GPa respectivement.

	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Lin brut	824 ± 329	39 ± 16
Lin traité	914 ± 336	37 ± 14
Chanvre	705 ± 287	47 ± 26
Polypropylène	556 ± 61	6 ± 1

Tableau II-7: Résistance et module d'élasticité en traction directe des fibres étudiées

On peut remarquer que les propriétés mécaniques des fibres végétales présentent une grande variabilité qui pourra être liée à plusieurs paramètres (composition chimique, culture de la plante, variabilité du diamètre sur la même fibre et donc l'incertitude sur la section). Cette variabilité se trouve aussi dans la littérature et elle complique la comparaison. Malgré cette hétérogénéité, on peut noter des résultats du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans la littérature (Le Hoang, 2013; Magniont, 2010a; Ramakrishna and Thirumalai, 2005b; Van de Velde and Kiekens, 2001).

4. LE MORTIER

Dans notre étude, deux types de mortiers ont été utilisés :

- mortier à base de liant cimentaire classique (le plus utilisé dans le domaine de la construction),
- mortier à base du liant pouzzolanique (impact environnemental inférieur et moins agressifs vis-à-vis des fibres végétales).

4.1. Constituants des matrices minérales

4.1.1. Ciment

Le ciment utilisé est un CEM II/B-LL 32,5 R CE NF conforme à la norme NF EN 197-1. Ses caractéristiques physiques et mécaniques sont présentées dans le **Tableau II-8**. Quant aux autres caractéristiques (composition chimique et fractions massiques des principales phases anhydres), elles sont récapitulées dans la fiche technique établie par le fournisseur disponible dans l'annexe 1.

		Valeur moyenne	Valeur Garantie
Caractéristiques physiques	Début de la prise (min)	170	>90
	Stabilité (mm)	1	<10
	Masse volumique (g.cm ⁻³)	3	-
	Demande en eau (%)	25	-
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	20	>12
	28 jours	40	>30

Tableau II-8: Les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé

4.1.2. Chaux

La chaux mise en œuvre est une chaux aérienne de type CL 90 conforme à la norme des chaux de construction EN 459-1. C'est une chaux d'une grande finesse, adaptée pour préparer des enduits de

finition appliqués en couches minces. Le **Tableau II-9** rapporte les caractéristiques chimiques et physiques de la chaux fournies par le fabricant.

Constituants chimiques (%)		Paramètres physiques	
SiO ₂	0,47	SSB (cm ² .g ⁻¹)	13260
Al ₂ O ₃	0,19		
CaO	73,05		
MgO	0,34	Masse Volumique (g.L ⁻¹)	450
Fe ₂ O ₃	0,18		
CO ₂	1,66		

Tableau II-9: Composition chimique et paramètres physiques de la chaux utilisée

4.1.3. Métakaolin

Le métakaolin utilisé dans notre travail est le produit Argicem commercialisé par la société Argeco basée dans le Lot et Garonne. Il est conforme à la norme NF P 18-513. Ce métakaolin est produit par une méthode dite de « calcination flash ». Cette méthode comporte les étapes suivantes :

- pré-chauffage des particules (Kaolin) qui permet d’augmenter la température dans la matière de 100°C à 500°C,
- cheminement des particules sous le mouvement d’air chaud vers la chambre de calcination (**Figure II-17**) qui est à une température d’environ 750 °C,
- rotation des particules autour de la flamme (1000 à 1200°C). C’est à ce moment que le kaolin subit une transformation thermique irréversible et se transforme en métakaolin. Les particules ne restent que quelques dixièmes de seconde dans la chambre de calcination, d’où le nom de procédé flash.

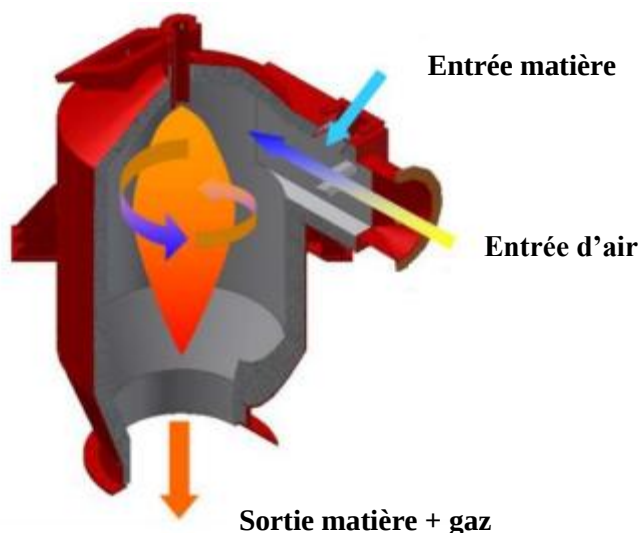


Figure II-17: Représentation schématique de la chambre de calcination (Nicolas, 2011)

Le métakaolin est un matériau caractérisé par un bilan environnemental avantageux par rapport à la production des autres liants minéraux comme le ciment. La calcination du kaolin (élément nécessaire pour la production du métakaolin) engendre seulement l’émission de vapeur d’eau. L’émission de CO₂ provient de la combustion du gaz nécessaire pour la réalisation de la calcination.

Le **Tableau II-10** résume les caractéristiques chimiques et physiques du métakaolin Argicem.

Constituants chimiques (%)		Paramètres physiques	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃	92,5	Masse volumique (g.cm ⁻³)	2,6
Cl	0,002	Finesse (%)	74,6
CaO	0,200	SSB (cm ² .g ⁻¹)	1566500
MgO	0,190	Demande en eau (%)	1,1
Na ₂ O	0,251	Indice d'activité (%)	102

Tableau II-10: Composition chimique et paramètres physiques du métakaolin utilisé

4.1.4. Sable

Un sable alluvionnaire-siliceux roulé de classe (0/2) mm conforme à la norme NFP18-545 a été utilisé. La densité et le coefficient d'absorption d'eau de ce sable sont 2,65 et 1,9 % respectivement.

4.1.5. Eau de gâchage

Pour la confection des mortiers, nous avons utilisé l'eau potable distribuée dans la commune d'Aureilhan (Hautes-Pyrénées). Sa teneur en chlore est égale à 0,18 mg.L⁻¹. Elle est donc inférieure à la valeur limite préconisée par la norme NF EN 1008 qui est 0,27 mg.L⁻¹. Son pH est égal à 7,6.

4.1.6. Adjuvants

Les adjuvants peuvent être ajoutés dans les formulations dans le but de leur conférer des propriétés particulières. Dans ce travail, deux types d'adjuvants ont été utilisés :

4.1.6.1. Sika ViscoCrete-850 Végétal :

Il s'agit d'un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent à base de polycarboxylates. Ce type d'adjuvant permet d'avoir une surface de contact plus importante entre les grains de liant et l'eau, ce qui lubrifie les composants et améliore la rhéologie du mélange obtenu.

4.1.6.2. Sulfate de potassium (K₂SO₄) :

C'est un activateur chimique. Il est utilisé dans cette étude pour améliorer la résistance mécanique au jeune âge des mortiers à base de liants pouzzolaniques (Dinh, 2014; Magniont, 2010a; Seng, 2018).

4.2. Caractérisation des mortiers

4.2.1. Préparation du mortier

Le malaxage est une étape importante pour obtenir un matériau applicable. Pour cette raison, le protocole de malaxage doit être adapté à la composition du mélange afin d'assurer une bonne homogénéisation. Dans notre travail, le protocole de malaxage normalisé NF EN 196 -1 d'un mortier non fibré a servi de référence. Dans le cas d'un mortier fibré, on a incorporé les fibres pendant la période de **pause** du malaxage dans le but de ne pas changer les étapes de la fabrication du mortier normalisé.

Les étapes du malaxage sont résumées sur la **Figure II-18**.

1	Malaxage du liant minéral avec l'eau pendant 30 s à vitesse lente
2	Introduction du sable pendant 1 minute
3	Malaxage pendant 30 s à grande vitesse
4	Pause : arrêt du malaxeur pendant 1 min et 30 s pour ramener les parties de mortier adhérents au bol. Si mortier fibré, introduction progressive des fibres en malaxant manuellement
5	Reprise du malaxage à grande vitesse pendant 60 s

Figure II-18: Les étapes du malaxage du mortier

Dans la littérature, il existe plusieurs procédures de malaxage pour les mortiers renforcés par des fibres (Chafei, 2014; Le Hoang, 2013; Malloy, 2019; Page, 2017b) mais aucune norme n'est disponible pour standardiser le malaxage du mortier fibré. Pour cette raison, on a étendu le protocole de malaxage normalisé des mortiers non fibrés au malaxage des mortiers fibrés sans changer les étapes de malaxage.

Durant tout le projet, le sable utilisé a été stocké dans un bidon fermé pour garder les mêmes conditions d'humidité et ce qui nous a permis d'éviter les déterminations de la teneur en eau du sable avant chaque gâchage.

L'introduction des fibres pendant la période de pause du malaxeur est efficace dans notre étude vue la faible quantité de fibres ajoutée dans un petit volume (0,5% et 1% en masse de liant). Dans le cas d'une grande quantité des fibres, cette méthode peut s'avérer problématique. En effet, introduire et mélanger progressivement une importante quantité de fibres peut demander du temps et déborder la période de pause du malaxeur.

4.2.2. Caractérisation des mortiers à l'état frais

4.2.2.1. La consistance des mortiers

La fluidité est un paramètre très important qui gouverne les conditions d'application d'un mortier. La rhéologie du matériau a été évaluée avec deux méthodes différentes : le maniabilimètre LCL et la table à secousses.

L'essai au maniabilimètre LCL (**Figure II-19**) a été réalisé conformément à la norme NF P 18-452. Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du matériau sous l'action d'une force de vibration. Trois essais ont été réalisés pour chaque formulation.

L'essai à la table à secousses (**Figure II-20**) a été réalisé selon la norme NF EN 1015-3. Le principe est de mesurer le diamètre d'étalement du mortier sur un plateau d'une table à chocs appliquant 15 chocs (hauteur de chute : 10 mm). Trois essais ont été aussi réalisés pour chaque formulation testée.



Figure II-19: Essai au maniabilimètre



Figure II-20: Essai à la table à secousses

4.2.2.2. Temps de prise

Conformément à la norme NF P15-431, le temps de début de prise a été déterminé avec un appareil Vicat équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'enfonce dans la pâte. Quand l'aiguille s'arrête à 6 mm du fond du moule, on considère que le début de prise est amorcé.

Cet essai est normalisé et adapté dans le cas d'une pâte sans fibre ce qui n'est pas le cas dans notre étude. En effet, la présence des fibres dans la pâte du liant peut perturber l'enfoncement de l'aiguille, avec pour conséquence des blocages de l'aiguille abusivement interprétés comme début de prise. Pour résoudre ce problème, nous avons réalisé des extractions des éluats des fibres en appliquant la méthode réalisée par (Page, 2017b).

L'extraction des éluats des fibres consiste à mettre les fibres en suspension dans l'eau dans le but de récupérer les constituants hydrosolubles des fibres responsables du retard de prise. Pour la préparation de l'extraction, nous avons utilisé le rapport eau/fibres utilisé pour la formulation des mortiers en ajoutant le taux d'eau absorbé par les fibres car cette eau ne pourra pas être récupérée après l'extraction (**Figure II-21**). Le mélange a été conservé dans une enceinte climatique à 20 °C et 50% HR pendant 48 h. La filtration a été réalisée en utilisant une passoire pour séparer les fibres et obtenir la solution qui contient les hydrosolubles (**Figure II-22**).



Figure II-21: Macération des fibres



Figure II-22: Solution des éluats des fibres

4.2.2.3. Analyse calorimétrique par calorimétrie isotherme

Pour une température fixée, la cinétique de la réaction d'hydratation des pâtes cimentaires et pouzzolaniques non fibrés et fibrés a été évaluée avec la méthode de calorimétrie isotherme. Cette méthode permet de déterminer la chaleur dégagée durant le processus d'hydratation, exprimée en J/g. Les chaleurs dégagées sont illustrées sous forme de chaleur cumulée.

Dans notre étude, nous avons utilisé le calorimètre isotherme TAM à 20°C avec un protocole décrit par la société TAM instrument. L'essai consiste à introduire 5 g de pâte dans une ampoule en verre scellée par la suite à l'aide d'une capsule métallique adaptée à cet effet. Les ampoules sont placées ensuite dans le calorimètre. Les flux de chaleur de l'ensemble des échantillons ont été mesurés pendant 1 semaine.

4.2.3. Caractérisation mécanique

4.2.3.1. Confection des éprouvettes

La description du protocole de malaxage a été détaillé dans la **section 4.2.1**. La confection des éprouvettes de mortier destinées à la caractérisation mécanique débute immédiatement après les différentes étapes de la phase malaxage. Le mélange est coulé dans des moules métalliques de dimensions 4x4x16 cm³ à 3 compartiments en introduisant une première couche dans chaque compartiment suivi par une opération de compactage sur une table à chocs (60 chocs conformément à la norme EN 196). Ensuite, le reste du volume est rempli et compacté de la même manière que précédemment. Le compactage de l'échantillon est indispensable dans le but de bien mettre en place le mortier et évacuer les bulles d'air qui sont piégées à l'intérieur du matériau. Après compactage, les moules sont couverts d'un film plastique et une plaque en bois. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage et conservées dans des sacs plastiques pour éviter les échanges d'eau avec le milieu environnant et ce jusqu'à la date de l'essai.

4.2.3.2. Essai de traction par flexion 3 points

L'essai de flexion 3 points a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm³ (**Figure II-23**) avec une presse universelle de marque Zwick/Roell Proline Z100 équipée d'une cellule de force de 5 kN de capacité. Cet essai était asservi en déplacement (flèche) à une vitesse de 0,5 mm/min. L'objectif de piloter cet essai de flexion en déplacement est d'accéder au comportement post-pic des composites pour mieux apprécier l'apport du renfort par des fibres. Les essais ont été réalisés à plusieurs échéances : 1, 3, 7, 28 et 180 jours. Pour chaque échéance, six essais par formulation ont été réalisés.

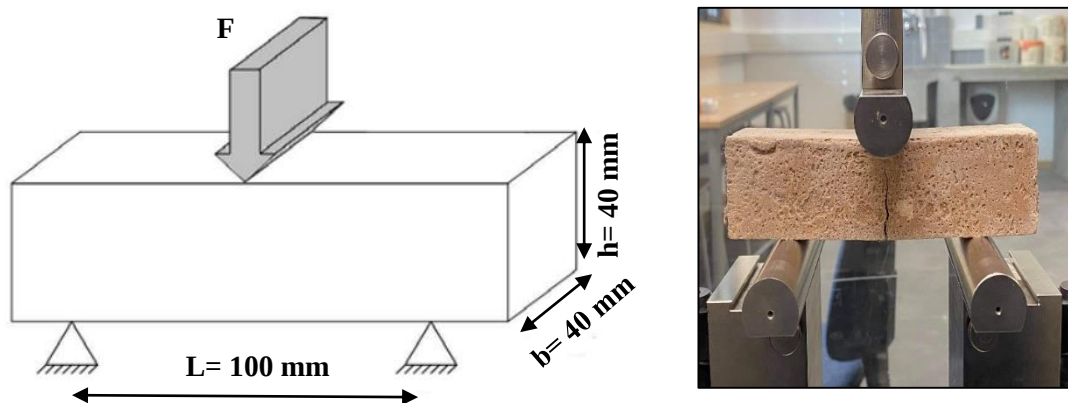


Figure II-23: Essai de flexion

La résistance à la flexion est calculée selon l'**Équation II-3** :

$$R_f = \frac{3 \cdot F_f \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Équation II-3}$$

Avec :	R_f	résistance en flexion du mortier (MPa)
	F_f	capacité portante maximale de l'éprouvette (N)
	L	distance entre les appuis (100 mm)
	b	largeur de l'éprouvette (40 mm)
	h	hauteur de l'éprouvette (40 mm)

Après l'essai de flexion, on obtient deux demi-éprouvettes ; l'une a été utilisée pour l'essai en compression et l'autre pour l'essai de porosité à l'eau.

4.2.3.3. Essai de compression

L'essai de compression a été mené sur une moitié d'éprouvette (**Figure II-24**) obtenue après l'essai de flexion 3 points à l'aide d'une presse de marque ControLab de capacité de 250 kN. Cet essai est réalisé à vitesse de chargement constante de 2,4 kN/s conformément à la norme NF EN 196-1. Six essais de compression ont ainsi été réalisés pour chaque formulation.



Figure II-24: Essai de compression

La résistance à la compression est calculée selon l' **Équation II-4** :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad \text{Équation II-4}$$

Avec :	R_c	résistance en compression du mortier (MPa)
	F_c	charge appliquée en compression (N)
	b	largeur de l'appui (40 mm)

4.2.4. Caractérisation physique

Porosité à l'eau

La porosité accessible à l'eau des échantillons a été déterminée par pesée hydrostatique conformément à la norme NF P18-459. Les essais sont réalisés sur 6 demi-éprouvettes issues d'éprouvettes de dimension 4x4x16 cm³. Ces demi-éprouvettes sont obtenues après les essais de flexion 3 points. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance précise à 0,01 g près.

Les étapes de la réalisation de l'essai de porosité à l'eau sont :

- mettre les échantillons dans un dessiccateur sous une pression inférieure ou égale à 25 mbar pendant 4 heures,
- introduire progressivement l'eau dans le dessiccateur pour qu'après 15 min, les échantillons soient recouverts d'environ 20 mm d'eau (**Figure II-25**),
- maintenir le dessiccateur en dépression pendant 44 h puis commencer les pesées des éprouvettes dans l'eau (**M_{eau}**) et dans l'air (**M_{air}**) (**Figure II-26**),
- mettre les échantillons dans une étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de leur masse, puis refaire la pesée dans l'air (**M_{sec}**).

La porosité à l'eau est calculée selon l'Équation II-5 :

$$\epsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 (\%)$$

Équation II-5

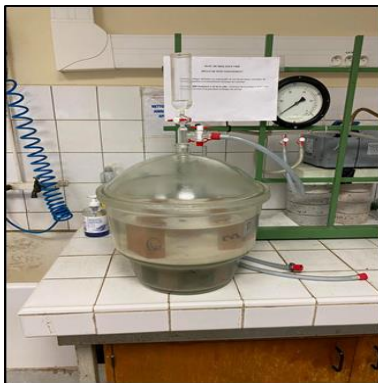


Figure II-25: Echantillons dans le dessiccateur



Figure II-26: Système de pesée hydrostatique

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des mortiers cimentaires et pouzzolaniques. La carte d'identité de chaque type de fibres a été élaborée (physiques, chimiques et mécaniques). Les résultats obtenus ont montré que les fibres végétales ont une capacité d'absorption d'eau qui dépasse leurs masses propres. L'analyse microscopique a montré que les fibres de polypropylène sont caractérisées par une surface homogène et lisse tandis que les fibres végétales ont une couche d'impuretés qui rend leur surface non uniforme et hétérogène. Le prétraitement réalisé sur les fibres de lin a montré une diminution de la teneur en hydrosolubles et une amélioration de l'état de la surface de fibres.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation des méthodes de préparation de la caractérisation des composites cimentaires et pouzzolaniques (confection, ouvrabilité, hydratation, propriétés mécaniques et physiques).

Après avoir présenté les matières premières et les méthodes de caractérisation du mortier, le **chapitre III** est focalisé sur la caractérisation des mortiers à l'état frais. Ce comportement sera évalué à travers des essais d'ouvrabilité (étalement et maniabilité), d'hydratation (temps de prise et cinétique d'hydratation) ainsi que de variation dimensionnelle de retrait au jeune âge.

Chapitre III. Formulations et caractérisation des mortiers à l'état frais

1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de présenter les formulations étudiées (références et fibrées) et leurs propriétés à l'état frais. Les formulations fibrées sont définies par rapport aux deux mortiers de référence, cimentaire et pouzzolanique.

Deux méthodes sont adoptées pour évaluer la rhéologie des formulations : le temps d'écoulement sous l'action d'une force de vibration et le diamètre d'étalement sous l'action d'une force de choc. L'objectif est de définir des règles simples d'incorporation des fibres végétales en maintenant les caractéristiques de référence. L'effet de l'ajout des fibres sur l'hydratation est également évalué. Cette évaluation est faite en déterminant le temps de début de prise pour chaque formulation et par le suivi de la réaction d'hydratation. Le but est de voir si l'incorporation des fibres et plus particulièrement des fibres végétales pénalise ou non la cinétique de l'hydratation des mortiers. Finalement, le retrait libre au jeune âge (retrait plastique) est quantifié. Le contact entre l'eau et le ciment provoque un enchaînement de réactions chimiques impliquant les phases anhydres du liant. Le matériau passe ensuite progressivement d'un état fluide à un état solide avec une évolution de la microstructure. Cette évolution de la microstructure s'accompagne d'une variation dimensionnelle, généralement de retrait conséquence de la contraction Le Chatelier et du retrait d'autodessiccation.

2. CHOIX DES FORMULATIONS

L'objectif de notre étude est d'effectuer une comparaison entre les mortiers non fibrés et les composites cimentaires et pouzzolaniques renforcés par des fibres végétales et par les fibres de polypropylène. Pour cette raison, la première étape de notre travail est d'établir les formulations de référence (non fibrées) et les mortiers cimentaires et pouzzolaniques incorporant des fibres. Un des critères primordiaux est que la rhéologie des mortiers fibrés doit permettre une mise en œuvre similaire à celle des mortiers de référence.

Dans la suite du manuscrit, nous allons adopter une nomenclature simple pour identifier les différentes compositions utilisées.

La nomenclature aura le format suivant :

A	B	C	D	XX
----------	----------	----------	----------	-----------

Les lettres sont choisies en se basant sur le code du **Tableau III-1** qui suit.

A	Type de liant	C : Cimentaire / P : Pouzzolanique
B	Présence des fibres	NF : Non fibré / F : Fibré
C	Type des fibres	P : Polypropylène / L : Lin / C : Chanvre
D	Traitement des fibres	B : Brut / T : Traité
XX	Dosage des fibres	% de masse de liant

Tableau III-1: Nomenclature des compositions

2.1. Formulations de référence

2.1.1. Mortier cimentaire

Pour le mortier cimentaire non fibré, nous avons choisi la formulation dont les dosages des constituants exprimés en pourcentage de liant sont présentés dans le **Tableau III-2**. Avant d'adopter cette configuration de dosage, plusieurs formulations ont été réalisées et testées. L'objectif était d'avoir un mortier pour une utilisation large applicable horizontalement comme verticalement.

Ciment	Sable	Eau
100	200	42

Tableau III-2: Composition du mortier cimentaire non fibré (%)

Le **Tableau III-3** montre la valeur du temps d'écoulement et la valeur du diamètre d'étalement pour le mortier cimentaire de référence sur lesquels on se basera pour optimiser la rhéologie des autres formulations cimentaires fibrées.

Temps d'écoulement (s)	Diamètre d'étalement (cm)
26,3 ± 0,5	13,7 ± 0,5

Tableau III-3: Les caractéristiques rhéologiques du mortier cimentaire de référence

2.1.2. Mortier pouzzolanique

Le dosage des différents ingrédients qui constituent la formulation pouzzolanique a été choisi en se référant sur les travaux réalisés par (Dinh, 2014; Magniont, 2010a). Ces auteurs ont développé et ont optimisé une matrice pouzzolanique pouvant servir de liant dans des mortiers ou des bétons végétaux.

Le **Tableau III-4** montre le dosage en pourcentage de liant pour les différents éléments qui constituent la matrice pouzzolanique.

Métakaolin	Chaux	Sable	Eau	Superplastifiant	K ₂ SO ₄
70	30	200	57	1	3

Tableau III-4: Composition du mortier pouzzolanique non fibré (%)

Les caractéristiques rhéologiques du mortier pouzzolanique non fibré sont présentées dans le **Tableau III-5**. Comme le mortier cimentaire, les valeurs obtenues seront les données de référence pour l'optimisation des formulations pouzzolaniques fibrées.

Temps d'écoulement (s)	Diamètre d'étalement (cm)
15,7 ± 0,6	14,8 ± 0,5

Tableau III-5: Les caractéristiques rhéologiques du mortier pouzzolanique non fibré

2.2. Formulations fibrées

L'étude bibliographique réalisée a mentionné les problèmes rencontrés à l'état frais avec les composites renforcés par des fibres et surtout les fibres végétales. Les propriétés de la fibre végétale telles que sa composition chimique, ses propriétés physiques ou sa morphologie perturbent l'ouvrabilité de la matrice. C'est pourquoi il est indispensable de trouver les bonnes solutions pour formuler un matériau fibré applicable comme le matériau de référence.

Le **Tableau III-6** montre les propriétés physiques des fibres utilisées. Pour les fibres polypropylènes, on a considéré un dosage de 0,25% (en masse de liant) ce qui correspond à un dosage classique recommandé par le fournisseur. En se référant sur la fiche technique fournie par le fabricant, une masse de 35 kg de liant consomme 0,1 kg de fibres de polypropylène ce qui correspond à un rapport massique de 0,29 %, qui reste du même ordre que le 0,25% retenu. De plus, on a décidé de travailler avec 0,5%

de fibres de polypropylène ce qui correspond à un dosage fort dans le but d'étudier l'influence du dosage. En tenant compte de la masse volumique des fibres polypropylène qui vaut $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$, du même ordre de grandeur que la moitié de celle des fibres végétales ($1,5 \text{ g.cm}^{-3}$), nous avons décidé de doubler le dosage de fibres végétales (0,5 et 1% en masse de liant). De tels dosages ont été déjà adoptés dans d'autres travaux antérieurs (Bertelsen et al., 2019a; Boghossian and Wegner, 2008; BOUTOUIL et al., 2012; Ferreira et al., 2016; Le Hoang, 2013; Page, 2017a; Rahimi et al., 2022).

Fibres	Masse volumique (g.cm^{-3})	Absorption d'eau (%)	Dosage (% en masse de liant)
Polypropylène	0,9	0	0,25 et 0,5
Lin	1,5	150	0,5 et 1
Chanvre		178	

Tableau III-6: Les caractéristiques physiques des fibres utilisées et leurs dosages

Les solutions proposées pour optimiser la rhéologie des formulations fibrées sont :

- compenser la quantité d'eau absorbée par les fibres végétales afin de maintenir constante la quantité d'eau pour l'hydratation et l'ouvrabilité,
- ajuster le dosage en superplastifiant pour améliorer la fluidité du matériau et faciliter l'enrobage et la dispersion des fibres.

2.2.1. Evaluation de la consistance des mortiers

Temps d'écoulement et étalement

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des deux paramètres étudiés pour évaluer l'ouvrabilité du composite. Tout d'abord, il faut mentionner que la quantité d'eau absorbée par les fibres de lin et de chanvre a été prise en compte en ajoutant 1,5 fois la masse de fibres incorporées. La rhéologie a été ensuite étudiée en deux temps : sans superplastifiant (sans SP) et avec superplastifiant (avec SP). Les conditions d'acceptabilité ont été choisies en se référant sur le pourcentage de la variation donné par la norme NF P 18-452 (temps d'écoulement) et la norme NF EN 1015-3 (diamètre d'étalement) qui vaut $\pm 10 \%$. On a calculé à chaque fois l'écart entre le mortier fibré et non fibré et si cet écart est inclus dans l'intervalle ($\pm 10 \%$), nous considérons que la rhéologie de la formulation est acceptable.

Les **Figure III-1** et **Figure III-2** présentent respectivement le temps d'écoulement et le diamètre d'étalement pour les formulations cimentaires. Dans le cas de formulations sans superplastifiant, les résultats obtenus montrent que la présence de fibres provoque une variation plus ou moins importante de la consistance. Le mortier de référence (CNF) a une consistance qui correspond à un temps d'écoulement de 26 secondes et un diamètre d'étalement de 14 cm environ. Pour les mortiers renforcés par les fibres de polypropylène, on peut constater qu'un dosage de 0,25% (CFP0,25) n'a pas affecté la consistance du mortier et que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celle du non fibré (temps d'écoulement de 27 secondes et 13 cm pour le diamètre d'étalement). Ceci est en accord avec l'utilisation actuelle de ces fibres à un dosage classique qui ne nécessite aucune adaptation des formulations. Par contre pour CFP0,5 qui correspond à un dosage de 0,5% des fibres de polypropylène, l'ouvrabilité a été plus affectée. Le temps d'écoulement a augmenté pour atteindre 29 secondes et le diamètre d'étalement a diminué jusqu'à 12 cm. Pour les formulations renforcées par des fibres végétales, la consistance est devenue médiocre. Pour un dosage de 0,5% de fibres de lin et de chanvre, le temps d'écoulement a dépassé les 40 secondes et le diamètre d'étalement est devenu inférieur à 12 cm. Ensuite, en passant de 0,5% à 1% de fibres végétales, le matériau devient non applicable. Le temps d'écoulement pour les fibres de lin et de chanvre a dépassé les 70 secondes et le diamètre d'étalement passe en dessous de 10 cm.

Les mêmes tendances sont relevées pour les formulations pouzzolaniques (**Figure III-3** et **Figure III-4**). Le mortier PNF a une consistance fluide (un temps d'écoulement de 16 secondes et 15 cm pour le diamètre d'étalement). Comme le mortier cimentaire, le PFP0,25 ne semble pas affecté et la rhéologie du matériau présente presque les mêmes valeurs que le PNF. Le PFP0,5 présente un temps d'écoulement de 27 secondes et 13 cm pour le diamètre d'étalement. Pour les formulations associées aux fibres végétales, l'ouvrabilité du matériau est devenue largement non acceptable surtout pour le temps d'écoulement (plus du double du mortier non fibré).

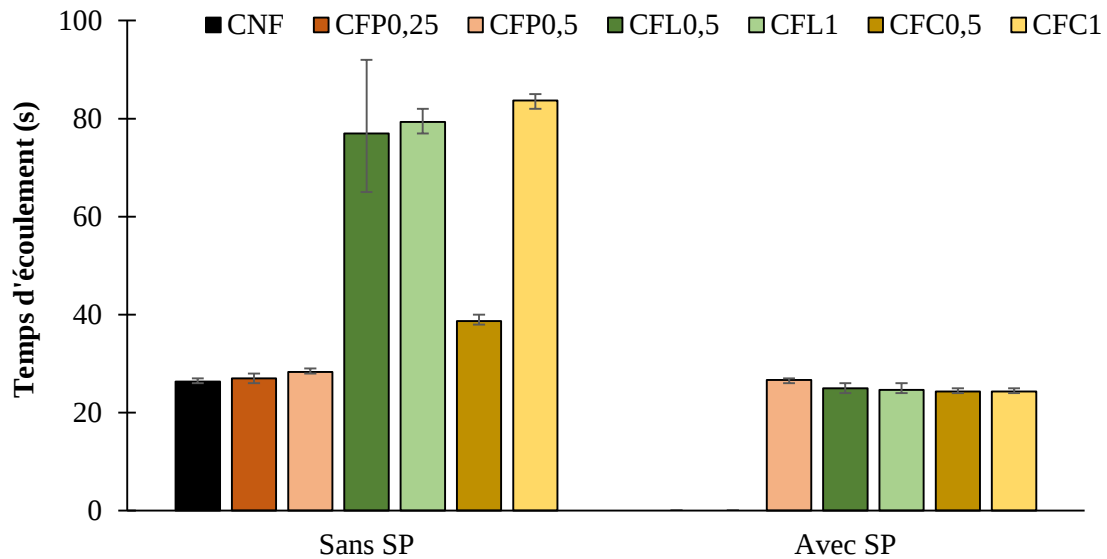


Figure III-1 : Le temps d'écoulement des formulations cimentaires sans superplastifiant (Sans SP) et avec superplastifiant (Avec SP)

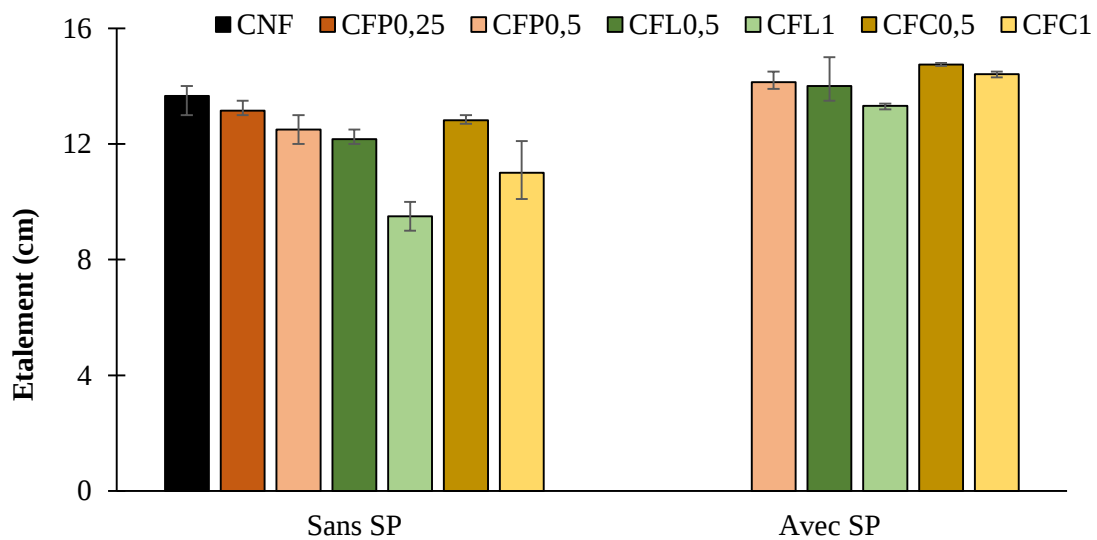


Figure III-2 : Le diamètre d'étalement des formulations cimentaires sans superplastifiant (Sans SP) et avec superplastifiant (Avec SP)

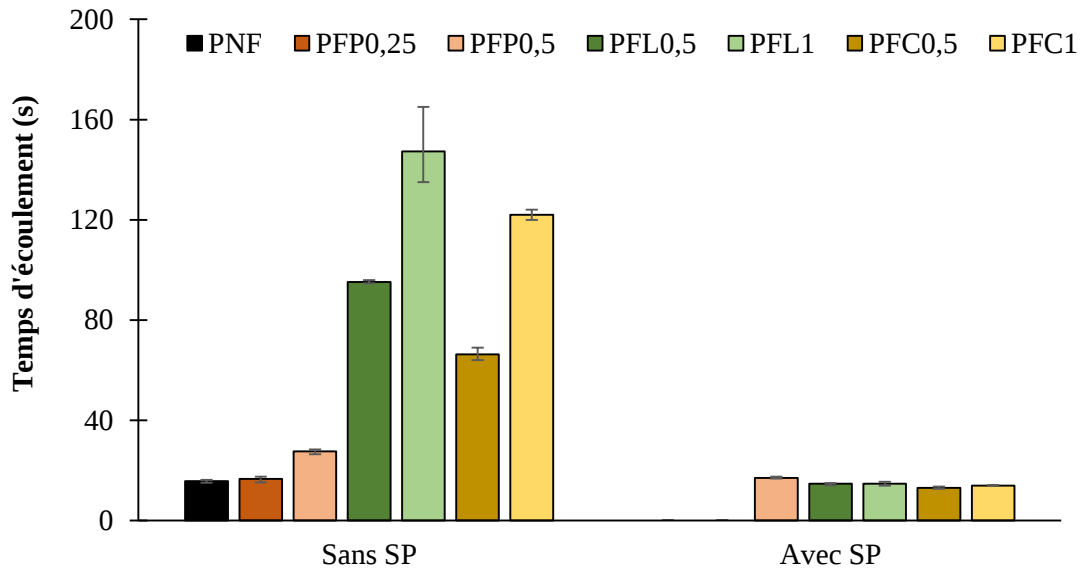


Figure III-3 : Le temps d'écoulement des formulations pouzzolaniques sans superplastifiant (Sans SP) et avec superplastifiant (Avec SP)

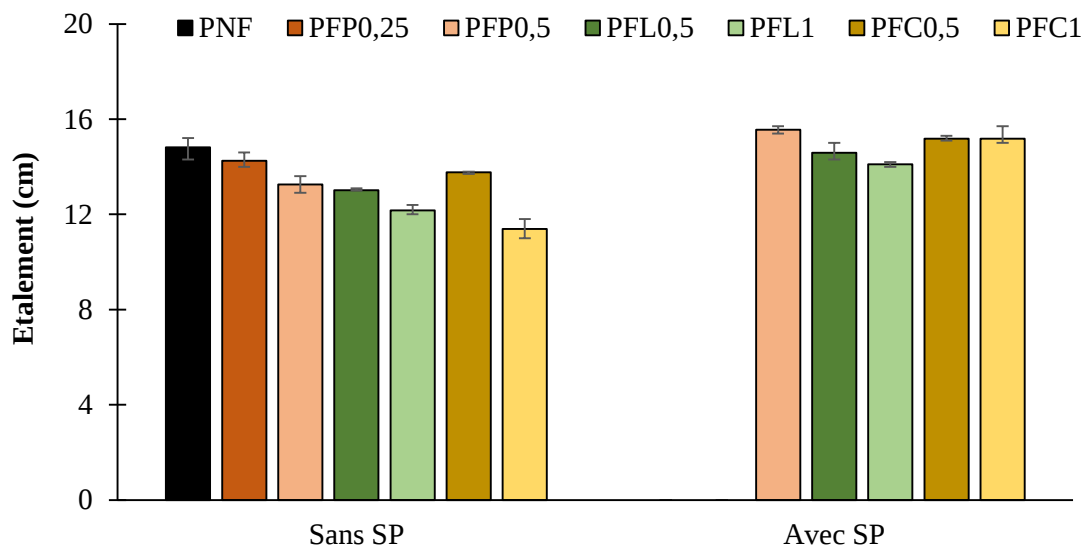


Figure III-4 : Le diamètre d'étalement des formulations cimentaires sans superplastifiant (Sans SP) et avec superplastifiant (Avec SP)

Les résultats de la consistance du matériau ont montré que malgré l'ajout de l'eau absorbée par les fibres végétales, l'ouvrabilité reste dans une situation non acceptable car l'écart obtenu par rapport au mortier non fibré est loin d'être inclus dans l'intervalle de variation proposée par les normes. L'ajout de superplastifiant était indispensable pour optimiser cette ouvrabilité. Pour choisir une teneur en superplastifiant qui permet d'atteindre l'ouvrabilité souhaitée, plusieurs essais préliminaires ont été réalisés avec plusieurs dosages. Les résultats obtenus ont permis de fixer la règle suivante : pour une masse M de fibres végétales ajoutée, on associe une masse $M / 2$ de superplastifiant. Les valeurs obtenues montrent que cette règle permet d'optimiser la rhéologie dans chaque formulation et d'avoir un comportement acceptable en référence au mortier non fibré. Le **Tableau III-7** montre l'écart en % du temps d'écoulement et de l'étalement pour les formulations fibrées par rapport au mortier de référence. Seules deux formulations renforcées par les fibres de chanvre, présentent un écart du temps d'écoulement de -16% et -11% (PFC0,5 et PFC1), le diamètre d'étalement restant dans les bornes fixées.

Ces écarts correspondant à un mortier un peu plus fluide malgré la présence des fibres, on peut les considérer comme non préjudiciables à l'utilisation.

Formulations	Ecart du temps d'écoulement (%)	Ecart du diamètre d'étalement (%)
CFP0,5	+2 ± 1	+3 ± 0,2
CFLB0,5	-5 ± 1	+2 ± 0,5
CFLB1	-6 ± 1	-3 ± 0,1
CFC0,5	-8 ± 0,5	+8 ± 0,1
CFC1	-8 ± 0,5	+5 ± 0,1
PFP0,5	+9 ± 0,4	+5 ± 0,2
PFLB0,5	-6 ± 0,3	-2 ± 0,3
PFLB1	-6 ± 0,7	-5 ± 0,1
PFC0,5	-16 ± 0,4	+2 ± 0,1
PFC1	-11 ± 0,2	+2 ± 0,2

Tableau III-7: Ecart (en %) par rapport au mortier de référence

En se référant aux résultats obtenus, on peut constater que la consistance des mortiers cimentaires et pouzzolaniques dépend non seulement du taux de fibres ajoutées mais aussi du type de fibres. Les fibres de polypropylène présentent une dispersion homogène (ABQ, 2005) dans le mortier ce qui n'est pas le cas pour les fibres végétales qui sont distribués de manière hétérogène (Chafei, 2014; Khelifa, 2017; Kriker et al., 2005). Cette hétérogénéité peut donner lieu à la formation d'oursins de fibres qui bloque parfois l'opération de malaxage. L'impact des fibres végétales vient certainement de l'hétérogénéité des longueurs, des diamètres et de la rugosité de surface ce qui est cohérent avec l'analyse MEB réalisée sur la surface. Ces observations ont été déjà mentionnées par d'autres auteurs en citant les mêmes paramètres qui interviennent sur la rhéologie (Chafei, 2014; Le Hoang, 2013; Page, 2017a; Sedan, 2007). On peut donc noter que pour une utilisation optimale, il sera nécessaire d'avoir un processus de fabrication donnant des longueurs et des diamètres contrôlés.

Après l'optimisation de la rhéologie du matériau, les compositions de toutes les formulations cimentaires et pouzzolaniques sont définies dans le **Tableau III-8** et le **Tableau III-9** respectivement.

	CNF	CFP0,25	CFP0,5	CFL0,5	CFL1	CFC0,5	CFC1
Ciment				100			
Sable				200			
Fibres polypropylènes	-	0,25	0,5	-	-	-	-
Fibres de lin	-	-	-	0,5	1	-	-
Fibres de chanvre	-	-	-	-	-	0,5	1
Eau	42	42	42	42,75	43,5	42,75	43,5
Superplastifiant	-	-	0,25	0,25	0,5	0,25	0,5

Tableau III-8: Composition des mortiers cimentaires exprimée en pourcentage massique de liant

	PNF	PFP0,25	PFP0,5	PFL0,5	PFL1	PFC0,5	PFC1
Chaux				30			
Métakaolin				70			
Sable				200			
K ₂ SO ₄				3			
Fibres polypropylènes	-	0,25	0,5	-	-	-	-
Fibres de lin	-	-	-	0,5	1	-	-
Fibres de chanvre	-	-	-	-	-	0,5	1
Eau	57	57	57	57,75	58,5	57,75	58,5
Superplastifiant	1	1	1,25	1,25	1,5	1,25	1,5

Tableau III-9: Composition des mortiers pouzzolaniques exprimée en pourcentage massique de liant

3. HYDRATATION DES MORTIERS

La littérature montre que la composition chimique des particules végétales pourrait modifier le processus d'hydratation. L'objectif de cette partie est de savoir si l'ajout des fibres végétales valorisées dans notre étude présente des effets préjudiciables à l'hydratation des liants utilisés pour la confection de nos mortiers.

3.1. Résumé bibliographique sur la réaction d'hydratation cimentaire et la réaction pouzzolanique

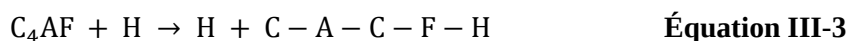
3.1.1. La réaction d'hydratation du ciment

Le ciment est une poudre minérale dont l'origine est le clinker qui est une roche artificielle produite à 1450° C à partir d'un mélange composé de 80 % de calcaire (CaCO₃) et 20 % d'argile (SiO₂, Al₂O₃) finement broyés et homogénéisés et quelques correctifs comme la bauxite, les oxydes de fer et le laitier. Les différentes entités chimiques présentes se combinent donnant naissance à quatre phases principales qui sont les C₃S, les C₂S, les C₄AF et les C₃A. Elles peuvent être classées en deux familles : celle des aluminates (C₄AF et C₃A) et celle des silicates (C₃S et C₂S). Le **Tableau III-10** montre les notations cimentaires de différents éléments contenant dans le ciment et ainsi les différents composants formés lors de l'hydratation.

L'hydratation du ciment Portland est un phénomène complexe mettant en jeu des réactions chimiques entre les composants du ciment et l'eau de gâchage. Ces réactions chimiques ont un caractère exothermique et consistent à l'hydratation des différentes phases du ciment donnant naissance à des nouveaux composés insolubles (**Équation III-1**, **Équation III-2**, **Équation III-3** et **Équation III-4**). Ceci entraîne la prise et le durcissement progressif du matériau.

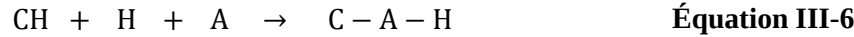
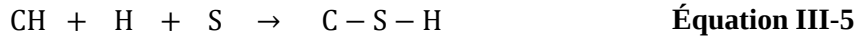
Nom	Notation cimentaire
Silicate tricalcique	C ₃ S
Silicate bicalcique	C ₂ S
Aluminate tricalcique	C ₃ A
Alumunoferrite tetracalcique	C ₄ AF
CaO : oxyde de calcium	C
SiO ₂ : dioxyde de silicium	S
H ₂ O : eau	H
Al ₂ O ₃ :oxyde d'alumunium	A
Fe ₂ O ₃ : oxyde de fer	F
SO ₃ : trioxyde de sulfate	S
silicates de calcium hydratés,	C-S-H
silico-aluminates de calcium hydratés	C-A-H
Hydroxyde de calcium	CH

Tableau III-10: Notations chimiques



3.1.2. La réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique est un phénomène de dissolution/précipitation entre la silice d'alumine provenant de la dissolution de la pouzzolane et l'hydroxyde de calcium CH présent dans la chaux hydraulique. Il se forme des silicates calciques hydratés (C-S-H) (**Équation III-5**) et aluminates calciques hydratés (C-A-H) (**Équation III-6**) qui précipitent sous forme de gel durcissant en une structure amorphe (Cabrera and Rojas, 2001; Frías and Cabrera, 2001; Sabir et al., 2001).



3.2. Temps de prise

3.2.1. Temps de prise mesuré avec l'eau contenant les éluats des fibres

Comme décrit dans le chapitre précédent, le temps de début de prise a été déterminé via l'essai Vicat sur pâte modèle (liant + eau). Pour les formulations fibrées, l'eau utilisée est obtenue après immersion des fibres dans l'eau pendant 48 heures et filtrée par la suite. Les résultats obtenus sont présentés sur la **Figure III-5** pour les pâtes cimentaires et sur la **Figure III-6** pour les pouzzolaniques.

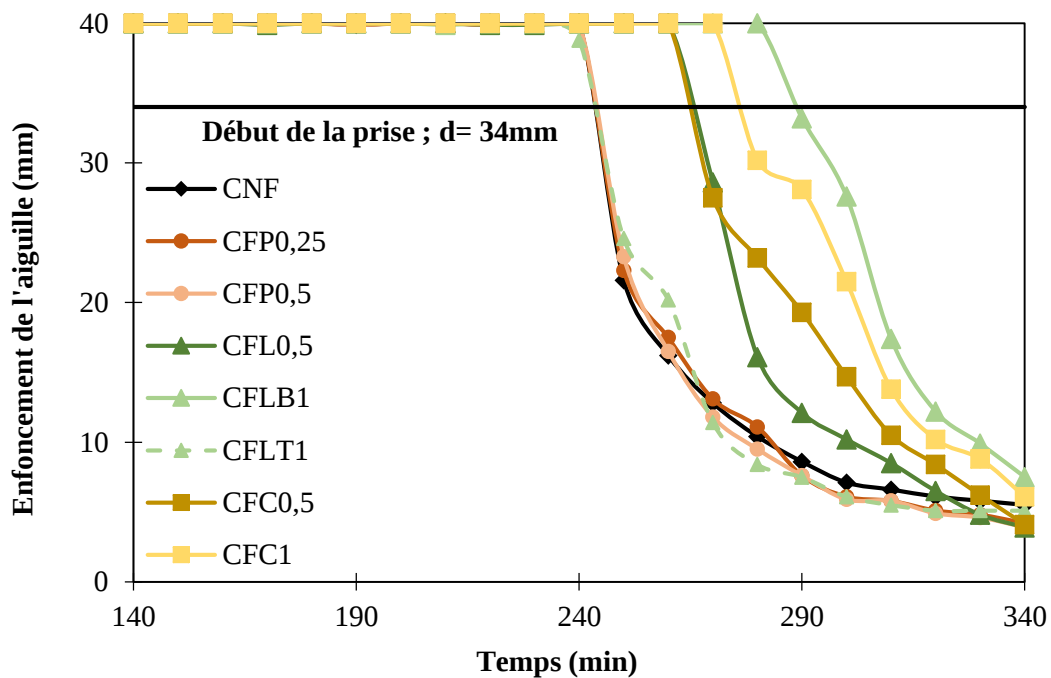


Figure III-5: Temps de début de prise (essai Vicat) sur les pâtes cimentaires

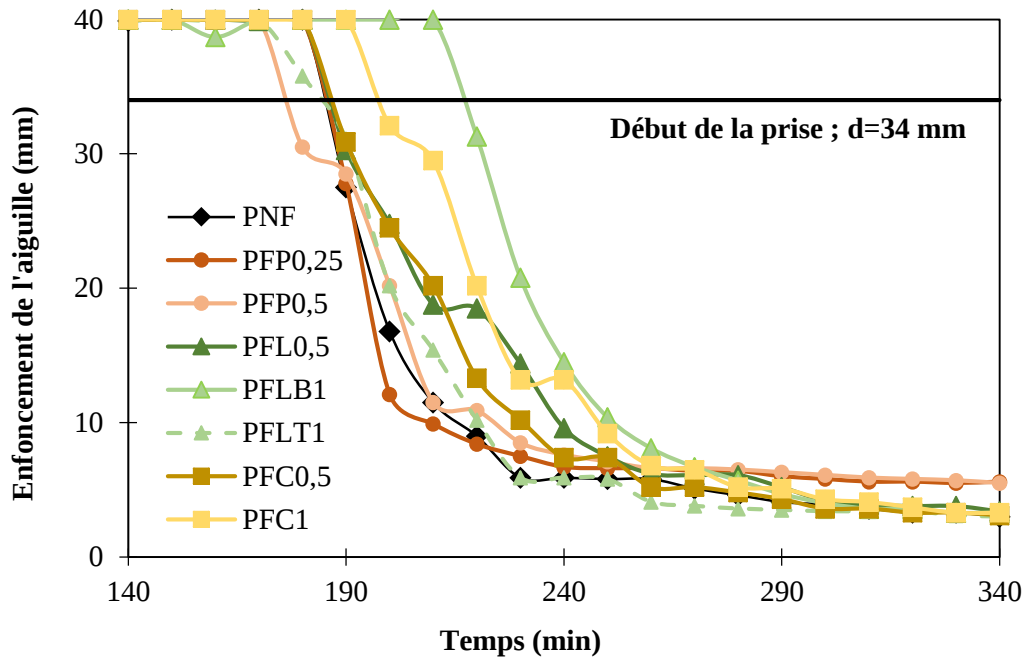


Figure III-6: Temps de début de prise mesurés (essai Vicat) sur les pâtes pouzzolaniques

On peut remarquer que les deux pâtes de référence ont le temps de début de prise le plus faible (250 min pour CNF et 180 min pour PNF). Pour les mortiers renforcés par les fibres de polypropylène, des valeurs de début de prise similaires ont été observées pour les deux types de liant et les deux dosages en fibres. Ces résultats sont logiques car les fibres de polypropylène ne contiennent pas d'élément hydrosoluble qui pourrait avoir un effet sur la cinétique de la prise.

Les pâtes qui sont réalisées avec l'eau contenant les éluats des fibres de lin brut et du chanvre ont un temps de début de prise plus important. Pour le mortier cimentaire, on a trouvé un temps de prise de 270 min pour CFL0,5 (10% de plus par rapport au CNF) et ce temps devient plus long lorsque le dosage en fibres augmente. Pour CFLB1 le temps de prise trouvé est de 300 min ce qui correspond à un retard de 20% par rapport au CNF. Les mêmes observations ont été faites dans le cas des fibres de chanvre. Pour CFC0,5 le temps de prise est de 265 min et 280 min pour CFC1 ce qui correspond à un retard de 7 et 15% respectivement. Pour le mortier pouzzolanique, la même influence pour les fibres de lin brut et de chanvre a été mentionnée. On a observé le même retard pour PFL0,5 et PFC0,5 (11 min) et un retard de 40 min pour PFLB1 et 25 min pour PFC1. Le retard de prise observé est lié aux différents mécanismes d'interaction entre les constituants chimiques des fibres végétales passés en solution et le liant minéral utilisé. En effet, les polysaccharides de la fibre sont piégés par les alcalins qui proviennent de la dissolution du liant. Ils peuvent les transformer en oligosaccharides solubles qui inhiberaient par la suite l'hydratation de la pâte cimentaire et pouzzolanique. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans la littérature (Chafei, 2014; Le Hoang, 2013; Page, 2017) qui ont montré l'effet perturbateur de l'addition des fibres végétales sur le processus de l'hydratation. (Sedan, 2007) a attribué le retard de prise à l'action des pectines contenues dans la fibre sur les ions calcium qui sont libérés suite aux réactions d'hydratation du liant. L'auteur a noté que les pectines sont les responsables de la chute de la quantité d'ions calcium et cette chute devient plus importante lorsque la teneur en fibres augmente. L'auteur a montré aussi que les ions Si^{4+} augmentent car la quantité faible d'ions calcium est insuffisante pour donner lieu au phénomène de précipitation et par conséquent à la formation d'un gel d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H).

Un liant cimentaire et un liant pouzzolanique diffèrent notamment par leurs réactions chimiques. Un liant cimentaire subit une réaction d'hydratation qui déclenche la libération des ions calcium et, par conséquent, en présence de fibres végétales ces ions réagiront avec les chaînes de pectines retardant

l'hydratation. Concernant la réaction pouzzolanique, il y a une consommation des ions calcium provenant de la chaux hydraulique et, en présence des fibres, cette consommation est ralentie et la réaction pouzzolanique devient plus longue. Toutes ces raisons expliquent bien le retard de la prise observé dans le cas des fibres végétales.

Pour les pâtes préparées avec l'eau contenant les éluats des fibres de lin traitées, on a observé que le temps de début de prise pour CFLT1 est de 250 min et 200 min pour PFLT1. Ces deux valeurs du temps de début de prise sont similaires au CNF et PNF. Dans le chapitre précédent, on a conclu que le traitement du lin par cycle d'humidification/séchage a permis de nettoyer la surface des fibres en réduisant le taux des hydrosolubles et surtout les pectines qui sont considérés comme des bons chélateurs d'ion calcium. L'analyse chimique du lin traité montre bien que les hydrosolubles sont responsables du retard observé pour les pâtes cimentaire et pouzzolanique.

Pour conclure, on peut noter que les fibres végétales pénalisent peu l'utilisation du mortier vis-à-vis du temps de début de prise (une durée supplémentaire de 20% maximum) et si ce paramètre doit être respecté, le traitement appliqué est une bonne solution.

3.2.2. Validité du test Vicat utilisant les éluats des fibres

La **Figure III-7** et la **Figure III-8** présentent une comparaison entre la mesure du temps de début de prise avec les fibres elles-mêmes et avec l'eau contenant les éluats des fibres.

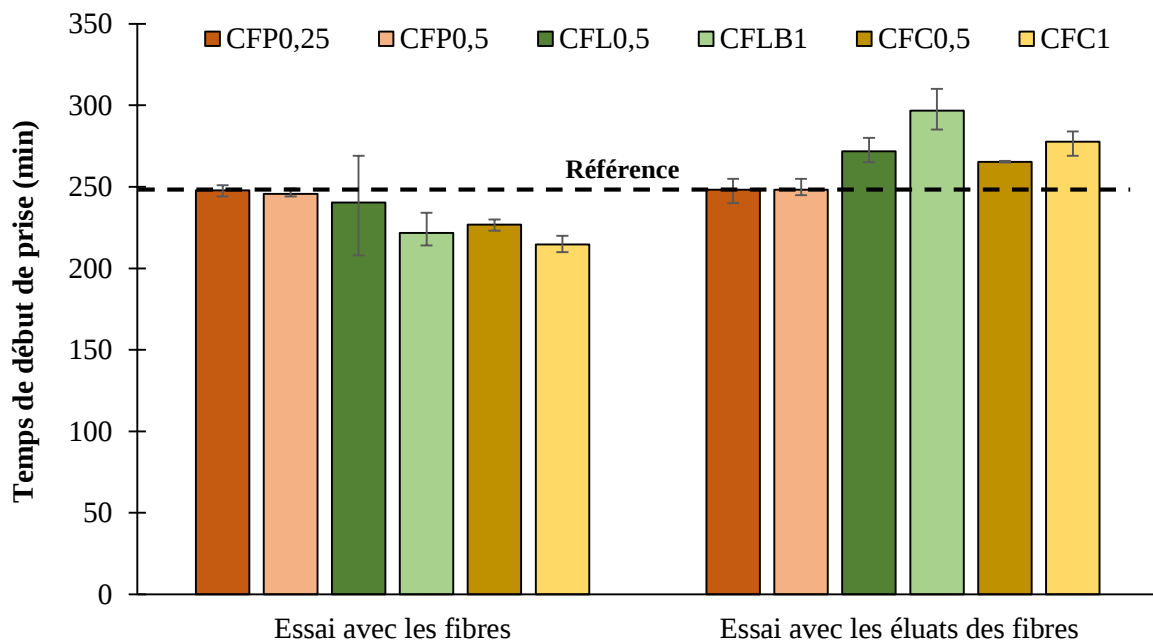


Figure III-7: Comparaison entre la mesure du temps de début de la prise des pâtes cimentaires les fibres et l'eau contenant les éluats des fibres

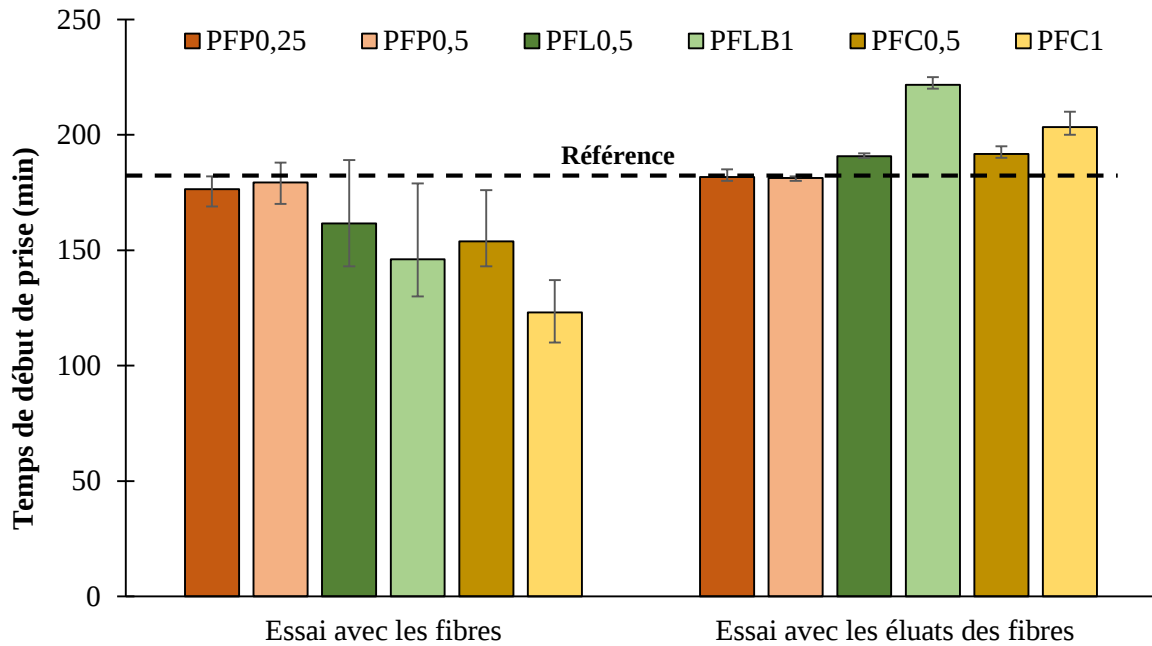


Figure III-8 : Comparaison entre la mesure du temps de début de la prise des pâtes pouzzolaniques avec les fibres et l'eau contenant les éluats des fibres.

Les résultats obtenus montrent une différence du temps de début de prise pour toutes les formulations fibrées entre les deux essais. En effet, la présence des fibres dans la pâte pourra freiner l'enfoncement de l'aiguille ce qui induit des valeurs fausses et non fiables. Pour les deux types de liants, on trouve un temps de début de prise des pâtes avec les fibres végétales plus court que la référence et également pour celles qui contiennent des fibres de polypropylène. Ces résultats sont incohérents avec la littérature qui montre un retard de prise en présence des particules végétales. De plus, on peut remarquer que plus la teneur en fibres augmente, plus le temps de début de prise diminue, ce qui n'est pas cohérent. Au regard du volume du moule utilisé pour l'essai Vicat, l'augmentation de la quantité de fibres augmente la possibilité pour que l'aiguille rencontre les fibres durant son enfoncement. On peut aussi noter qu'il y a une dispersion au niveau des résultats bien plus importante. Parfois on trouve un temps de début prise moins long que celle de la pâte de référence et parfois plus long. On peut conclure que l'extraction des éluats des fibres est la bonne méthode pour avoir des résultats représentatifs, fiables et comparables. De plus, l'éluat est distribué dans toute la masse alors que les fibres contaminent une zone limitée à leur environnement.

3.3. Chaleur d'hydratation

Pour compléter les résultats précédents, on a réalisé une évaluation de chaleur d'hydratation par calorimétrie isotherme. C'est une méthode qui permet de quantifier et de qualifier la cinétique d'avancement du processus d'hydratation. Elle exploite son caractère exothermique. Les tests de calorimétrie isotherme ont permis d'explorer l'impact des extractibles végétaux sur les réactions d'hydratation et sur les mécanismes de prise des liants.

La **Figure III-9** présente le flux de chaleur des différentes pâtes cimentaires testées au cours des premières 48 heures. On peut mentionner que, pour toutes les courbes, l'augmentation la plus importante du flux de chaleur a eu lieu aux alentours de 7 heures. Cela correspond au pic exothermique d'hydratation des C_3S et C_2S . En comparant les différents mélanges, on trouve que le pic exothermique est presque similaire entre toutes les pâtes mais avec un peu de décalage dans le temps et moindre en présence d'éluats de fibres végétales. Le pic exothermique est apparu aux alentours de 8 heures pour CNF et 9 heures pour CFLB et CFC. Pour les pâtes préparées avec la solution des fibres de lin traitées,

on peut noter une réaction d'hydratation similaire au CNF (évolution et cinétique équivalentes entre les deux pâtes)

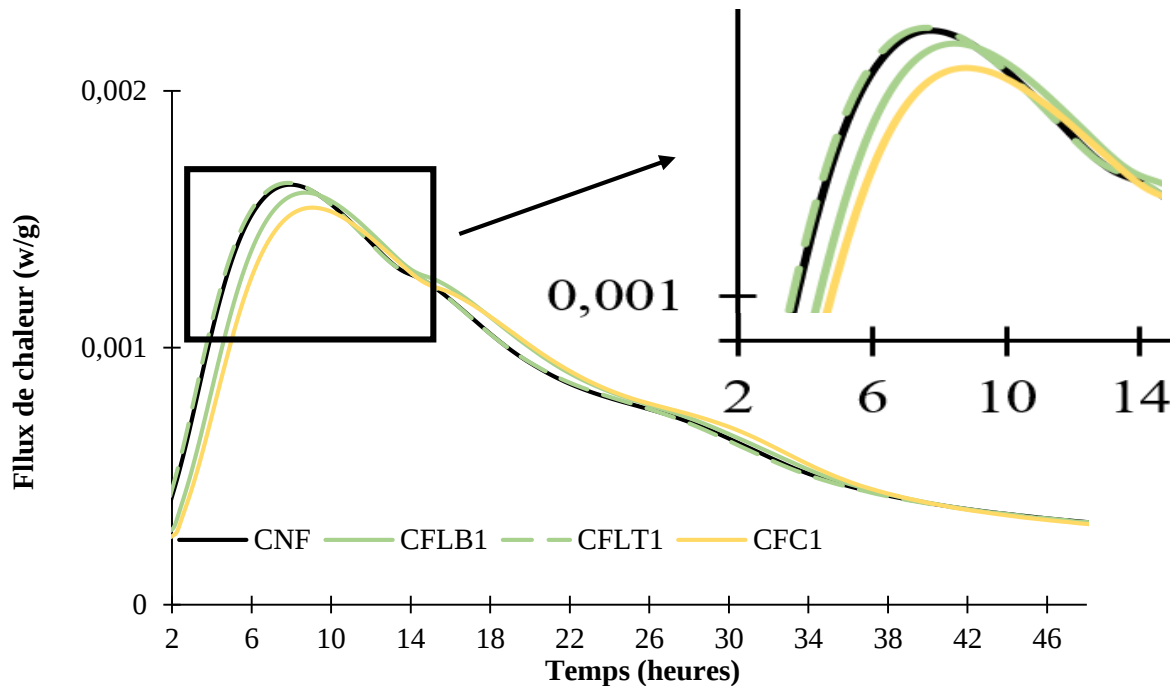


Figure III-9: Flux de chaleur par calorimétrie isotherme de la pâte cimentaire témoin (eau claire) et des pâtes avec des solutions contenant les éluats des fibres

La **Figure III-10** illustre la variation du flux de chaleur instantané au cours des premières 48 heures pour les pâtes pouzzolaniques. Les résultats obtenus mettent en évidence deux zones différentes.

Zone I : Le pic exothermique observé dans cette zone correspond à la réaction entre le sulfate de potassium et les ions calcium provenant de la chaux hydraulique formant l'ettringite.

Zone II : Cette section correspond à la réaction pouzzolanique.

On peut noter une augmentation significative du flux de chaleur aux alentours de 6 heures. Le mortier de référence (PNF) présente un pic exothermique plus important que celui des pâtes préparées avec la solution issue des fibres. Le pic exothermique des pâtes fibrées (PFLB et PFC) apparaît bien plus tard, aux environs de 7 heures. Pour PFLT, on peut observer une augmentation du flux de chaleur maximal qui s'approche de celui de PNF pour un temps de 6,5 heures.

Pour les deux types de mortiers, on pourra conclure que le retard observé est lié aux hydrosolubles contenus dans la solution qui perturbent le processus d'hydratation. Pour la pâte préparée avec une solution des fibres de lin traité, on observe des résultats presque similaires au mortier de référence. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus lors des essais Vicat concernant l'effet des hydrosolubles et l'impact d'un prétraitement sur l'hydratation des mortiers.

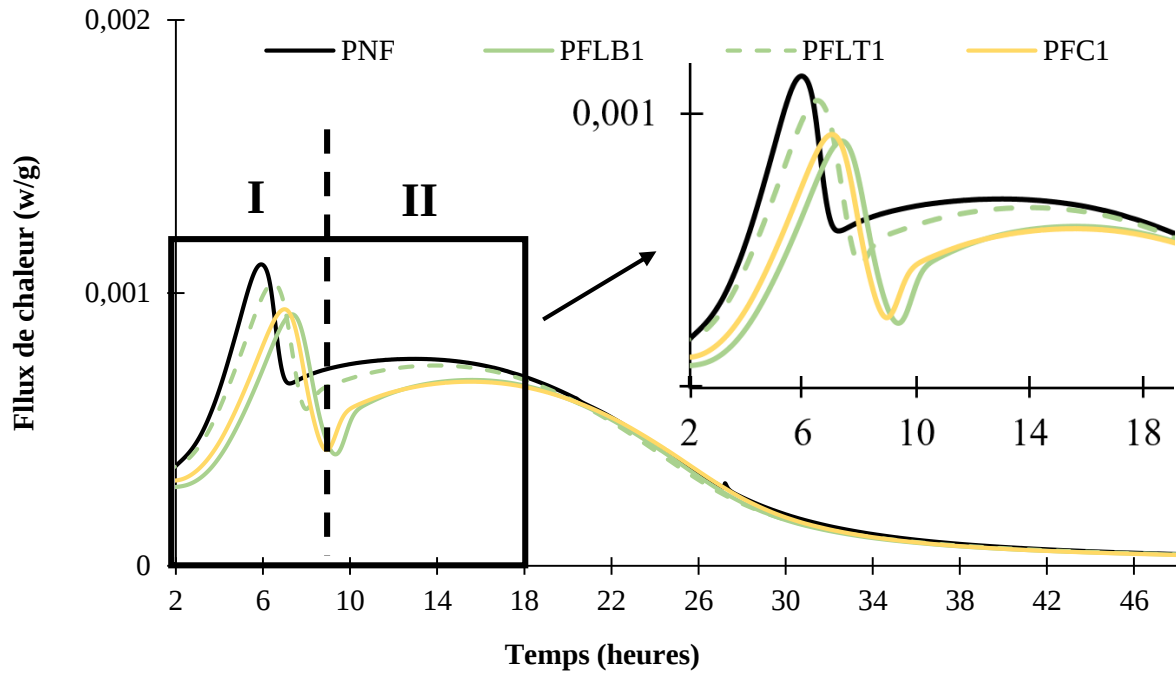


Figure III-10: Flux de chaleur par calorimétrie isotherme de la pâte pouzzolaniques témoin (eau claire) et des pâtes avec des solutions contenant les éluats des fibres

La Figure III-11 montre la chaleur totale dégagée au cours de l'essai pour les mortiers cimentaires. On peut mentionner que la chaleur observée pour le mortier cimentaire est presque la même pour toutes les pâtes (valeurs comprises entre 190 et 205 J.g⁻¹) donc le petit retard observé pour le pic exothermique ne semble pas avoir un effet sur le dégagement de chaleur total pendant l'essai.

(Miller and Moslemi, 1991) ont noté qu'il existe plusieurs retardateurs de prise dont le saccharose. Ces types de retardateurs s'adsorbent de façon préférentielle sur les aluminates. En effet, l'hydratation des aluminates contenus dans le ciment est très rapide, exothermique, et intervient dans les premiers instants de l'hydratation du ciment. Les hydrosolubles issus des particules végétales peuvent attaquer les aluminates en les empêchant de réagir avec le sulfate du gypse pour former l'ettringite mais laissent les silicates suivre normalement leur développement pour former les C-S-H. Ce mécanisme peut expliquer la similarité observée sur la quantité de chaleur totale dégagée.

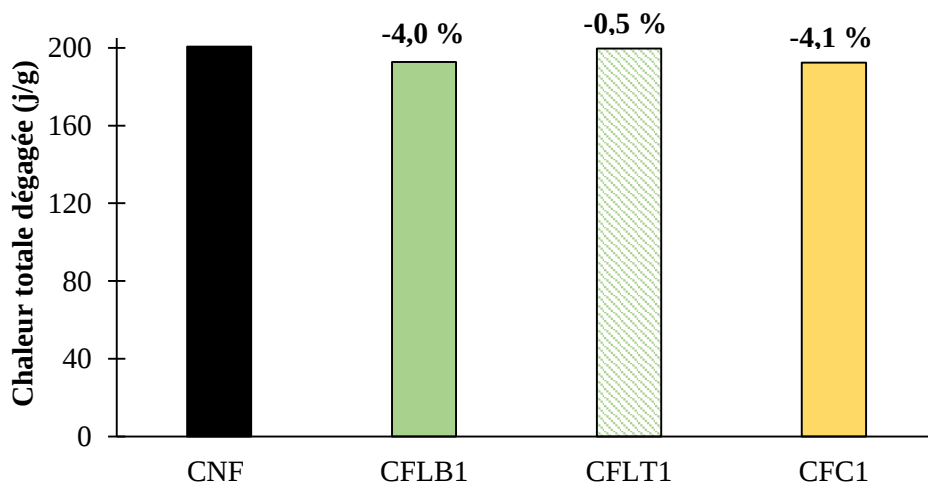


Figure III-11: La chaleur totale dégagée pour les pâtes cimentaires et le pourcentage de réduction par rapport au CNF

La **Figure III-12** montre la chaleur totale dégagée au cours de l'essai pour les mortiers pouzzolaniques. On peut observer une différence plus importante que pour le mortier cimentaire.

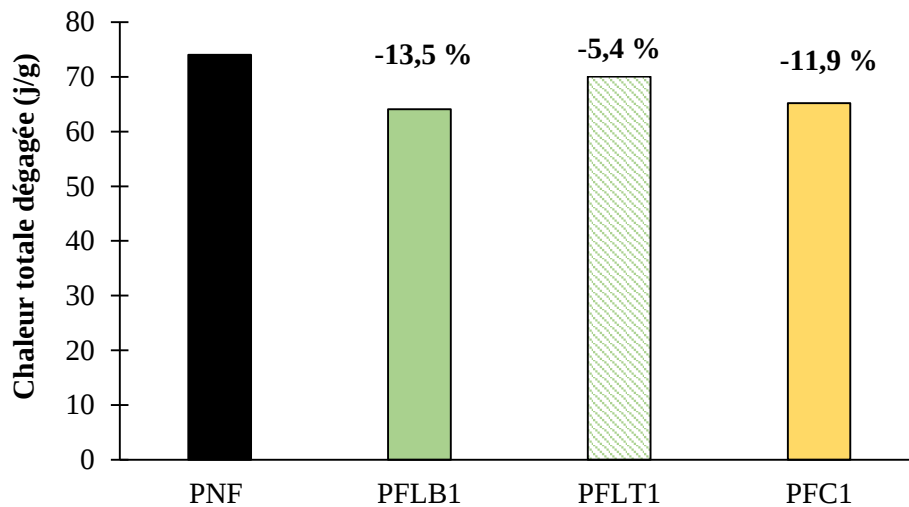


Figure III-12: La chaleur totale dégagée pour les pâtes pouzzolanique et le pourcentage de réduction par rapport au PNF

On peut mentionner que le test Vicat et la calorimétrie isotherme donnent des résultats cohérents. Les fibres végétales ont un effet retardateur sur le temps de début de prise et sur la cinétique d'hydratation. Ce retard est lié à la réaction entre les éléments chimiques contenus dans les particules végétales et les ions calcium présents lors de la réaction d'hydratation du liant. Le traitement par cycles d'humidification/séchage réalisé sur les fibres de lin permet de diminuer la migration des extractibles dans les solutions, ce qui engendre une quantité de la chaleur totale dégagée plus proche de la référence.

4. RETRAIT PLASTIQUE

4.1. Résumé bibliographique sur le retrait du matériau au jeune âge

Le retrait plastique est défini comme étant la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage (Wittmann, 1976). Ce retrait induit des contraintes de traction qui peuvent dépasser la résistance à la traction du matériau au jeune âge et donc générer des fissures (Bertelsen et al., 2019a; Chemkhi, 2008; FEBELCEM, 2001; Le Hoang, 2013; Wyrzykowski et al., 2015). Ce type de retrait est considéré comme une déformation linéique dont les mesures se font d'une manière horizontale. Cette déformation est engendrée par les forces capillaires dues au ménisque d'eau de la face séchante (Nicot, 2008; Souche, 2015; Turcry, 2004; Wittmann, 1976).

Il faut noter que les réactions chimiques du liant minéral (hydratation, pouzzolanique...) conduisent la suspension de béton plastique à devenir peu à peu un solide poreux (Souche, 2015). Selon (Kovler and Roussel, 2011; Stefan, 2009; Vemuri, 2008), ces types de transformations impactent les propriétés du béton au très jeune âge donc le ressuage et le retrait plastique. La phase plastique s'achève quand le matériau acquiert un comportement de solide poreux et peut s'opposer aux déformations imposées (Cortas, 2012; Souche, 2015).

Le **Tableau III-11** présente les mécanismes qui causent le retrait plastique et les différents paramètres qui affectent ce type de retrait.

Mécanismes à l'origine du retrait plastique	Paramètres affectant le retrait
Le tassement Le retrait de séchage Le retrait endogène	Vitesse d'hydratation Ressuage et taux d'évaporation Géométrie et taille des pores

Tableau III-11: Les caractéristiques du retrait plastique (Turcry, 2004)

Comme mentionné ci-dessus, les contraintes provoquées par des changements de volume tels que le retrait entraîne la fissuration due à la faible résistance en traction des matériaux au jeune âge. L'étude de la variation dimensionnelle est importante pour évaluer l'efficacité des fibres à limiter la fissuration.

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes expérimentales qui permettent d'évaluer le retrait plastique via les mesures linéiques. Le principe de la mesure linéique est de mesurer la variation dimensionnelle horizontale d'un échantillon du matériau placé dans un moule prismatique (Bertelsen et al., 2020, 2019a; Boghossian and Wegner, 2008; Fourdrin et al., 2000; Kouta et al., 2020; Le Hoang, 2013; Sirajuddin and Gettu, 2018; Souche, 2015; Turcry, 2004, 2004; Wyrzykowski et al., 2015). Lorsque la surface du matériau est laissée à l'air libre, en ambiance contrôlée, le déplacement correspond au retrait dû au séchage et à l'hydratation. Dans le cas où l'évaporation est empêchée, il correspond au retrait endogène accompagné des déformations thermiques si la température du matériau n'est pas maintenue constante (Turcry, 2004).

Quelques exemples sur les bancs expérimentaux mis en œuvre pour quantifier le retrait plastique sont présentées sur les **Figure III-13**, **Figure III-14**, **Figure III-15** et **Figure III-16**. La plupart des méthodes consistent à évaluer le déplacement horizontal lors de la contraction du matériau en utilisant des capteurs. Chaque auteur a défini le protocole expérimental en fonction de son objectif (**Tableau III-12**).

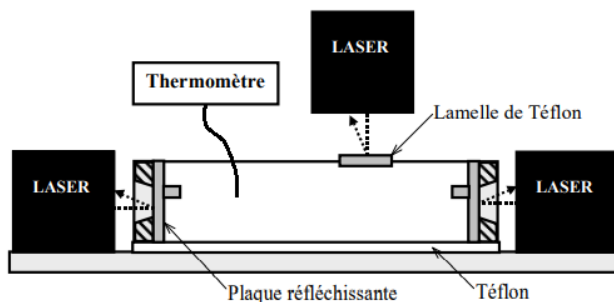


Figure III-13: Dispositif de mesure des déformations plastiques (Turcry, 2004)

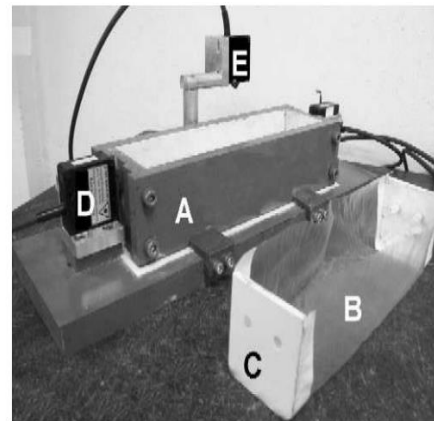


Figure III-14: Dispositif de mesure des déformations plastiques : moule 7x7x28 cm (A), enveloppe (B+C), capteurs laser (D et E) (Turcry, 2004)

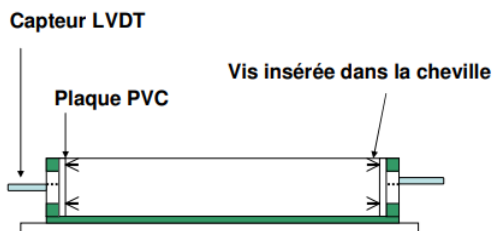


Figure III-15: Dispositif pour quantifier le retrait plastique réalisée par (Mbemba-Kiele, 2010)

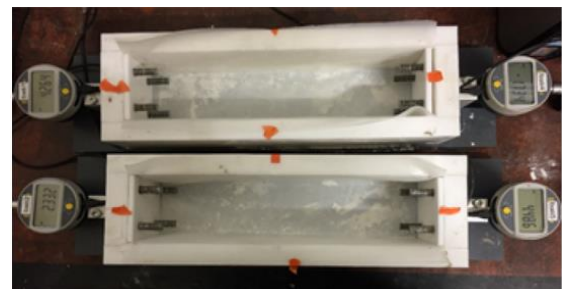


Figure III-16: Dispositif du retrait plastique adoptée par (Kouta et al., 2020)

Le **Tableau III-12** présente les caractéristiques des dispositifs réalisés par différents auteurs sur la mesure du retrait plastique.

Référence	Dimensions du moule (mm ³)	Conditions imposées	Type de capteurs
(Kouta, 2020)	70 x 70 x 280	T : 20 ± 1 °C HR : 60 ± 2 %	2 LVDT
(Turcry, 2004)	70 x 70 x 280	T : 20 °C HR : 60 %	2 capteurs lasers
(Souche, 2015)	300 x 300 x 100	T : 20 ± 2 °C HR : 50 ± 4 %	7 capteurs lasers
(Nicot, 2008)	400 x 350 x 150	T : 20 °C HR : 65 %	2 LVDT
(Mbemba-Kiele, 2010)	70 x 70 x 280	T : 20 ± 2 °C HR : 50 ± 4 %	2 LVDT
(Le Hoang, 2013)	40 x 40 x 160	T : - HR : -	Télémètre laser
(Sayahi et al., 2019)	1200 x 400 x 90	T : 20 ± 1 °C HR : 30 ± 3 %	2 LVDT

Tableau III-12: Les caractéristiques des différents dispositifs pour mesurer le retrait plastique

4.2. Dispositif expérimental

Pour évaluer les déformations plastiques, notre choix s'est porté sur une méthode linéaire, qui prend en compte l'ensemble des causes (effet de séchage et effet de l'hydratation).

Le retrait plastique libre horizontal a été mesuré sur des mortiers placés dans un moule prismatique en bois contreplaqué filmé de dimensions 550 x 60 x 60 mm³. L'intérieur du moule est huilé et recouvert d'un film plastique pour éviter le frottement entre les parois et le mortier (**Figure III-17**). Les deux extrémités du moule sont percées en leur centre pour insérer la tige métallique et le capteur de mesure. Deux capteurs LVDT ont été utilisés pour mesurer les déplacements. Ces capteurs sont liés aux tiges métalliques grâce à un aimant (**Figure III-18**). Les capteurs utilisés permettent de mesurer le déplacement jusqu'à une valeur maximale de 2 mm. Quand le matériau subit une contraction de son volume, il entraîne la tige métallique ce qui permet également au capteur de se déplacer (**Figure III-19**). Ce déplacement du capteur sera enregistré chaque minute pendant 6 heures. Les tests ont été effectués dans un tunnel à 35 ± 2 °C et une humidité relative de 25 ± 4 %.

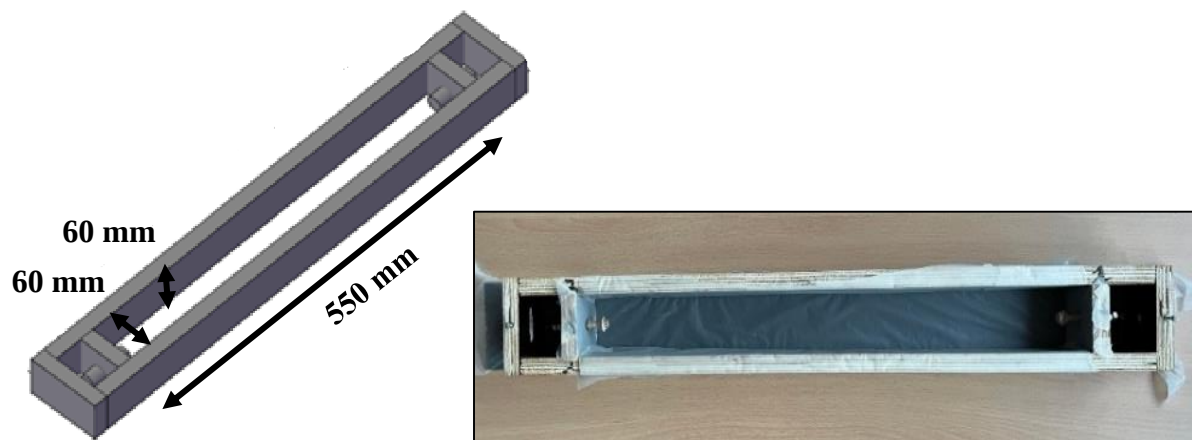


Figure III-17: Le moule prismatique fabriqué pour mesurer le retrait plastique

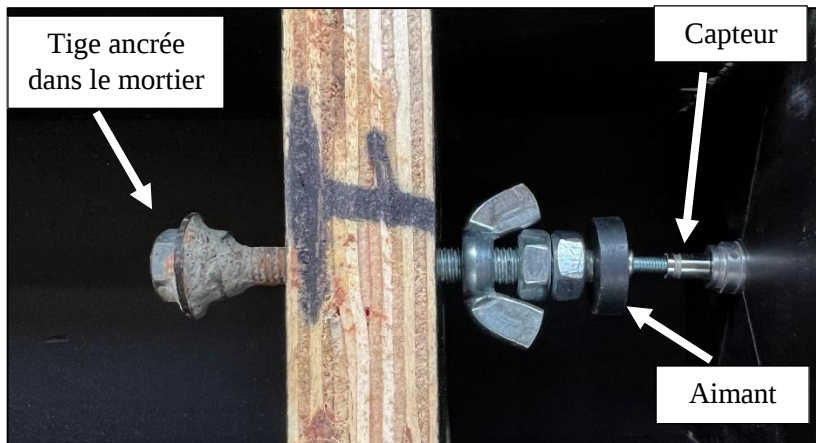


Figure III-18: Les différents éléments du dispositif expérimental pour la mesure du déplacement lié au retrait plastique

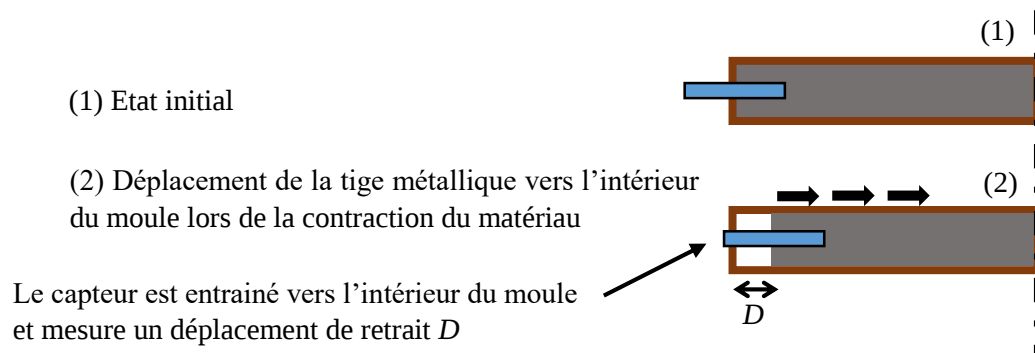


Figure III-19: Principe de mesure du déplacement lié au retrait plastique

Traitement des résultats

Le retrait plastique a été déterminé selon l'Équation III-7 :

$$\varepsilon_p = \frac{D_1 + D_2}{L} \quad \text{Équation III-7}$$

Avec :	ε_p	retrait plastique ($\mu\text{m/m}$)
	D_1	déplacement mesuré avec le capteur 1 (μm)
	D_2	déplacement mesuré avec le capteur 2 (μm)
	L	base de mesure (longueur du moule = 0,55 m)

4.3. Résultats et discussions

La **Figure III-20** montre une évolution typique de la déformation de retrait plastique. La courbe obtenue présente 4 zones différentes.

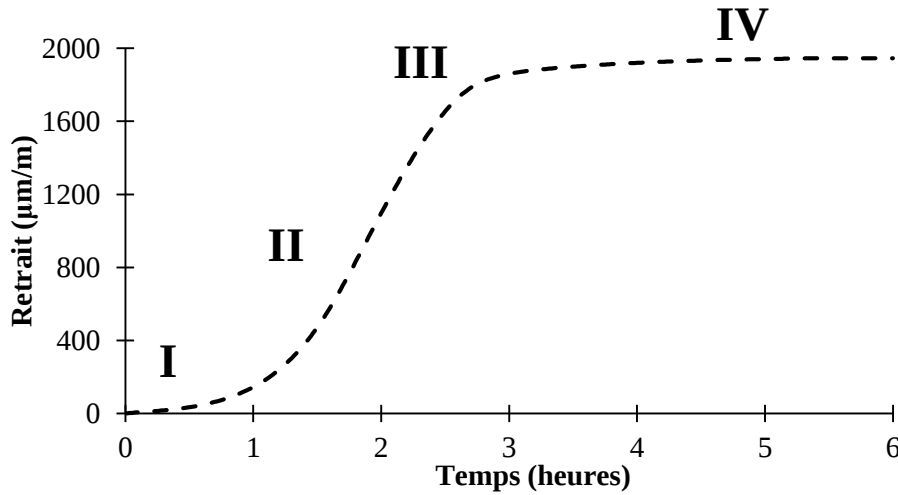


Figure III-20: Evolution typique du retrait plastique pour un mortier

Phase 1 : le retrait plastique commence à se développer presque immédiatement après le coulage indiquant l'absence de l'eau de ressuage qui peut être causée par l'absorption d'eau par les particules fines et les fibres.

Phase II : le retrait augmente d'une manière considérable, ce qui peut être lié à l'augmentation de la dépression capillaire due à l'évaporation et à la consommation d'eau par les réactions d'hydratation.

Phase III et IV : la vitesse du retrait commence à diminuer jusqu'à la stabilisation qui signifie que le retrait plastique a atteint sa limite et la contraction volumétrique s'arrête.

Dans le but d'effectuer la comparaison entre les différentes formulations testées, on s'est basé sur deux paramètres : la vitesse du retrait et le niveau de la stabilisation après 6 heures. La **Figure III-21** montre la manière de déterminer la vitesse du retrait et la valeur finale. La vitesse correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe et le niveau de stabilisation correspond au dernier point détectée par le capteur (à l'échéance de 6 heures).

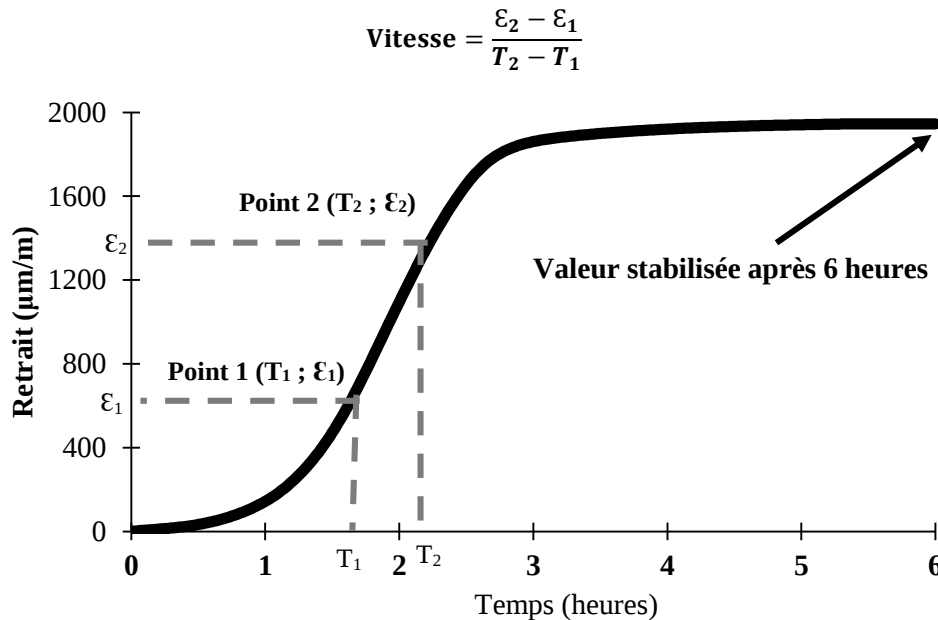


Figure III-21: Principe de la détermination de la vitesse du retrait et de la valeur finale

Retrait plastique des différentes formulations

Les essais de retrait plastique ont été réalisés dans un tunnel qui produit des conditions sévères variables et qui dépendent des conditions ambiantes du laboratoire. La variation des conditions entre les essais ne permet pas de calculer la moyenne de la vitesse et celle du niveau de stabilisation. On a décidé de calculer pour chaque essai l'écart en pourcentage entre la formulation de référence (CNF ou PNF) et une autre formulation fibrée (fibres de lin ou de polypropylène) testées en même temps ce qui signifie dans les mêmes conditions. Ceci permet d'obtenir une moyenne des écarts entre les différentes formulations. Nous avons réalisé 4 tests pour chaque formulation. Chaque formulation fibrée a été accompagnée par le mortier de référence dans le but de calculer l'écart en % entre ces deux formulations. Le **Tableau III-13** présente les écarts en % de la vitesse du retrait et du niveau de stabilisation de la référence. La valeur (Moy) signifie la moyenne de l'écart obtenu sur les 4 tests pour chaque couple (fibré et non fibré). Les deux valeurs (Max) et (Min) représentent les valeurs maximales et minimales de l'écart obtenu sur les 4 tests pour chaque formulation.

Ecart avec le mortier de référence (%)						
	Vitesse initiale du retrait			Niveau de stabilisation		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
PFP0,5	-12	-24	-6	-29	-36	-24
PFLB1	+24	+7	+45	+27	+16	+35
CFP0,5	-15	-27	-7	-21	-38	-8
CFLB1	+21	+7	+37	+44	+31	+57

Tableau III-13: Les écart (%) de la vitesse initiale et du niveau de stabilisation du retrait plastique pour les mortiers fibrés par rapport à la référence

Les résultats obtenus présentent une grande variabilité pour toutes les formulations. Cela peut être lié à la non homogénéité des mélanges (dispersion des fibres dans la matrice) ainsi qu'aux conditions environnementales de l'essai (T° , HR). Néanmoins, une tendance générale se dégage : toutes les formulations ont eu des écarts cohérents (positifs ou négatifs) entre les différents tests.

Pour les mortiers renforcés par des fibres polypropylènes, on observe une diminution de la vitesse du retrait de 12% pour PFP0,5% et 15% pour CFP0,5%. Le niveau de stabilisation est réduit de 29% pour PFP0,5 et 21% pour CFP0,5. Pour les mortiers avec des fibres de lin, on peut noter une augmentation de la vitesse du retrait de 24% pour PFLB1 et 21% pour CFLB1. Le niveau de stabilisation a subi une augmentation de 27% pour PFLB1 et 44% pour CFLB1.

La **Figure III-22** montre des exemples de l'évolution de la variation dimensionnelle des mortiers (référence et fibré) en fonction du temps. Tout d'abord on peut noter que toutes les courbes présentent les 4 phases décrites précédemment. Cependant, selon la nature des fibres, il y a une différence sur la pente de la phase II, l'âge du retrait maximal et la valeur maximale du retrait plastique.

L'ajout des fibres polypropylène diminue légèrement la pente associée à la phase linéaire du retrait (Phase II). D'autre part, on peut voir que la courbe du retrait s'infléchit et plafonne presque au même moment que pour le mortier non fibré mais avec une valeur maximale plus faible. Par contre, l'incorporation des fibres de lin augmente la pente de la partie linéaire et forme un palier presque au même moment que le mortier non fibré mais avec une valeur plus grande.

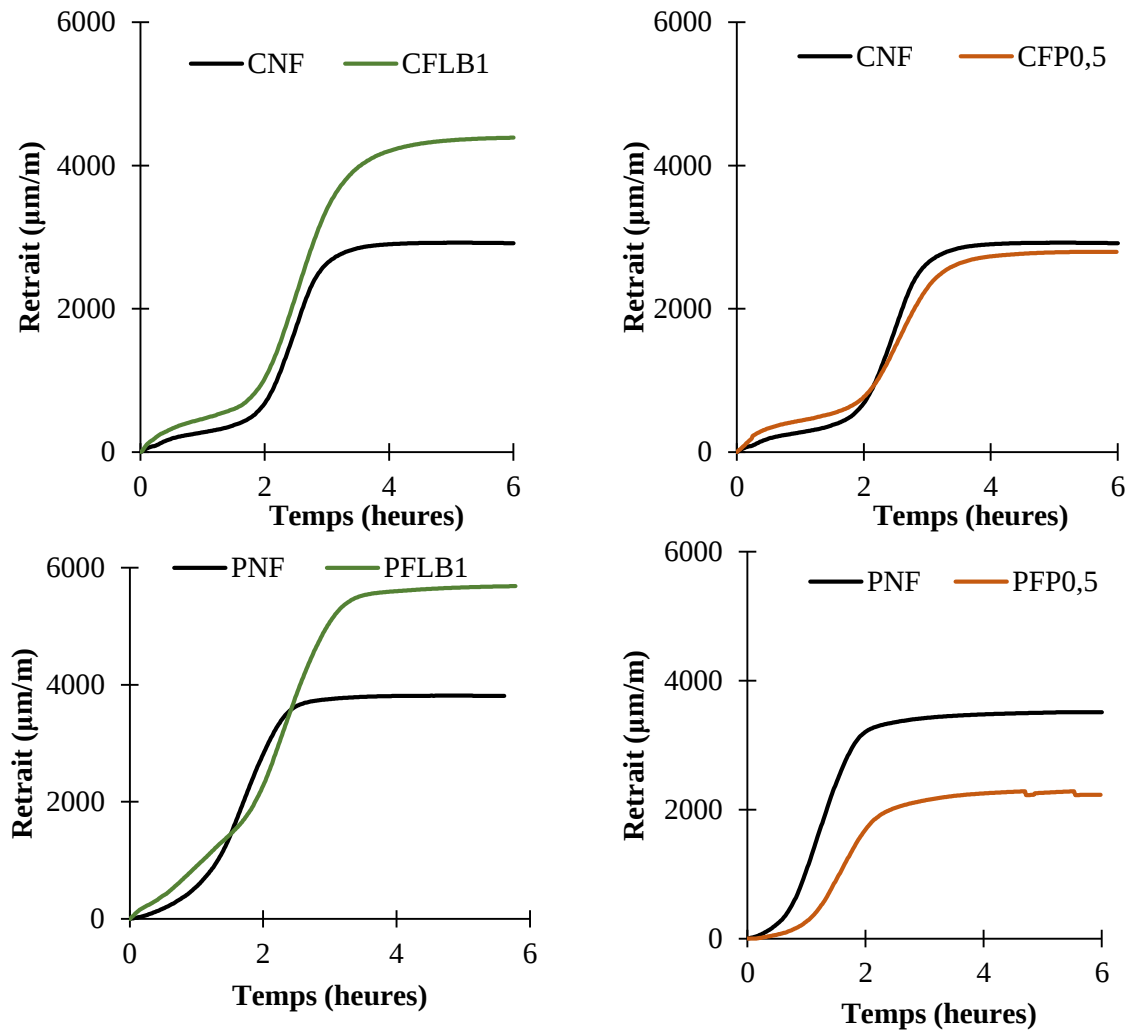


Figure III-22 : Evolution du retrait plastique des mortiers (témoins et fibrés) en fonction du temps

Deux questions qu'on peut se poser ici :

Question 1 : *Qu'est ce qui explique cette augmentation du retrait pour les mortiers avec les fibres végétales ?*

Comme montré précédemment, les conditions hygrothermiques, les réactions chimiques du liant et la composition du mortier sont des paramètres qui influent sur le mécanisme du retrait. La **phase II** de la courbe du retrait correspond à l'augmentation de la dépression capillaire grâce à l'évaporation et à la consommation d'eau par les réactions d'hydratation (Baroghel-Bouny, 1994). Dans le cas des mortiers renforcés par les fibres végétales, il est indispensable de prendre en compte le caractère hydrophile de ce type des fibres. La courbe de la cinétique d'absorption d'eau des fibres de lin a montré qu'après 30 min d'immersion une grande quantité a été absorbée par le lin. Cette capacité d'absorption d'eau par les fibres présente une contrepartie : au fur et à mesure que le béton se dessèche, la fibre relargue son eau et se rétracte. Ce retrait des fibres avec le retrait lié à l'évaporation d'eau et à la réaction d'hydratation du liant peut expliquer l'augmentation de la vitesse du retrait et du niveau de stabilisation des mortiers renforcés par les fibres de lin par rapport au mortier non fibré. La littérature montre des résultats contradictoires sur l'évolution du retrait plastique du composite au jeune âge. Selon (Le Hoang, 2013), l'addition de fibres de lin dans le mortier cimentaire induit une augmentation du retrait plastique qui continue de s'accroître avec l'augmentation de la teneur en fibres. Par contre, (Bertelsen et al., 2020) ont noté une diminution du retrait en présence des fibres végétales.

Question 2 : Qu'est ce qui explique cette diminution du retrait pour les mortiers renforcés par les fibres polypropylènes ?

Comme on l'a vu, le **Tableau III-13** montre que les mortiers renforcés de fibres polypropylènes présentaient une vitesse de retrait plus faible que la référence. Pour expliquer cette diminution de la vitesse, (Tran et al., 2021) ont noté que les fibres en polypropylène dans le béton jouent le rôle d'aiguilles qui induit une augmentation de la zone de friction entre les grains ce qui les empêche de se mobiliser et par conséquent diminue la variation dimensionnelle du matériau au jeune âge. Cet effet des fibres polypropylènes revient à leur surface spécifique importante qui induit une bonne adhérence avec la matrice au jeune âge (Bao et al., 2021; Filho and Sanjuán, 1999; John and Anandjiwala, 2009; Shen et al., 2020).

L'ensemble des résultats obtenus dans ce paragraphe, nous permet de cibler les points suivants :

- l'influence du caractère hydrophile des fibres de lin sur l'évolution du retrait au jeune âge,
- le rôle des fibres ajoutées au mortier dans la réduction (fibres polypropylènes) ou dans l'augmentation (fibres de lin) du retrait plastique du matériau.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, la caractérisation des mortiers à l'état frais a été présentée. L'ajout des fibres végétales affecte significativement la rhéologie du mortier en augmentant le temps d'écoulement et en diminuant le diamètre d'étalement. Malgré la compensation de la quantité d'eau absorbée par les fibres végétales, l'ouvrabilité obtenue demeure insuffisante. Néanmoins l'ajout de superplastifiant avec un dosage qui correspond à 50% de la masse de fibres dans chaque formulation permet de corriger l'ouvrabilité du mortier. Dans le cas de fibres polypropylènes, la rhéologie est moins affectée.

L'étude de l'hydratation du mortier via la cinétique de prise et la chaleur d'hydratation a montré que l'ajout des fibres végétales perturbe le processus d'hydratation en retardant le temps de début de prise, le pic exothermique et diminuant la quantité de chaleur dégagée. Pour les fibres de lin traitées, on a observé moins d'impact négatif sur l'évolution de l'hydratation. Celle-ci redevient comparable à celle du mortier témoin. L'ajout des fibres polypropylènes n'a pas perturbé l'évolution de l'hydratation du mortier. On peut donc noter que les fibres végétales pénalisent peu l'utilisation du mortier vis-à-vis du temps de début de prise (écart maximal de 20%) et la quantité de chaleur total dégagée (écart maximal de 14%).

On a aussi relevé que les fibres polypropylènes améliorent la densité de contact des grains dans le matériau à l'état frais ce qui les empêche de se déplacer. La conjugaison de tous ces effets entraîne la réduction de la cinétique et de l'amplitude du retrait plastique. Par contre, l'ajout des fibres végétales cause une augmentation du retrait plastique à cause de leur caractère hydrophile. Ceci met en évidence le phénomène d'absorption puis de relargage d'eau au jeune âge causant une variation volumique des fibres végétales et du composite.

Si l'effet des fibres polypropylènes et celui des fibres végétales sur le retrait plastique sont opposés, il est nécessaire de compléter cette étude par une évaluation de la sensibilité de ces formulations vis-à-vis de la fissuration au jeune âge. Dans ce but, nous les avons mises en œuvre en conditions de retrait empêché. C'est l'objet du chapitre IV.

Chapitre IV. Effet du renfort par des fibres végétales sur la sensibilité à la fissuration des mortiers au jeune âge

1. INTRODUCTION

Dans les structures à base de liant minéral comme le ciment, le retrait des couches minces de mortier (notre cas) est souvent associé à un risque de fissuration. La variation dimensionnelle du matériau, si elle est empêchée notamment par son adhérence à un support stable, induit des contraintes de traction qui peuvent dépasser la résistance à la traction du matériau et ainsi la fissuration du mortier. L'incorporation de fibres dans le mortier est potentiellement une solution pour diminuer la sensibilité à la fissuration ou pour contrôler la fissuration ainsi induite dans le mortier au jeune âge.

Le but de ce chapitre est d'étudier la capacité des fibres végétales à remplacer les fibres polypropylènes principalement utilisées pour cette fonction. Tout d'abord, une étude bibliographique sur les différents moyens d'évaluation de la sensibilité à la fissuration à l'état frais est présentée. Ensuite, on aborde la description du tunnel servant à produire des conditions environnementales sévères ainsi que les deux essais que nous avons mis au point dans le cadre de cette étude. Le premier essai utilise un moule dont les dimensions sont inspirées de la norme ASTM C1579 et le deuxième consiste à utiliser ce mortier comme enduit d'une base en brique, une configuration proche de l'application réelle. Les résultats concernant l'effet des fibres sur la fissuration due au retrait plastique sont accompagnés par la mesure de la perte en masse des formulations cimentaires et pouzzolaniques.

2. RESUME BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Présentation du phénomène du retrait empêché

Quelques heures après le coulage, le mortier qui a déjà développé un module d'élasticité est soumis aux effets d'une dépression capillaire avec une consigne de se rétracter. Si le matériau est coulé sur un support adhérent cette contraction (retrait) est empêchée ce qui induit des contraintes de traction internes qui pourraient dépasser la résistance du matériau initiant ainsi la fissuration. Comme on le verra d'autres dispositifs peuvent être utilisés pour empêcher ce retrait simulant ainsi des conditions plus favorables à la fissuration. Cette dernière peut surgir au moment de la phase plastique du mortier ou dans les jours suivant la prise et le durcissement. La température, les conditions de cure, la vitesse du vent, la nature du liant, des ajouts supplémentaires ou le rapport E /C influencent ce phénomène de fissuration. (Bertelsen et al., 2020, 2019a; Mbemba-Kiele, 2010; Nicot, 2008; Souche, 2015; Turcry, 2004).

Avant de passer à la présentation des essais qu'on a développés pour évaluer la sensibilité à la fissuration, il convient tout d'abord d'introduire les différentes techniques permettant la caractérisation du retrait empêché. Celles-ci ont été développées dans le but de déterminer l'âge d'apparition des fissures, leurs nombres, leurs tailles et les contraintes qui se développent dans le matériau, lorsque la déformation de retrait qu'il subit est gênée.

2.2. Méthodes de caractérisation du retrait empêché

2.2.1. Essai à l'anneau ou ring test (ASTM C1581-2004)

Le ring test est l'essai le plus utilisé pour évaluer la sensibilité à la fissuration due au retrait empêché. Cette méthode est associée à la norme ASTM C1581 – 2004 dans laquelle le mortier est coulé autour d'un anneau métallique (**Figure IV-1**). La paroi extérieure amovible permet un séchage sur une seule

face. La forme de l'éprouvette imposée par cet essai et la faible déformabilité du métal génèrent du retrait empêché et donc la fissuration de la couche de mortier. La performance du mortier est évaluée par l'échéance d'apparition de la fissuration, le nombre de fissures, leur ouverture et leur taille. On peut mesurer les déformations par noyage de jauges de déformation ou collage sur l'intérieur de l'anneau central. Cette méthode nécessite une quantité importante des matériaux vu le volume imposé. De nombreux auteurs ont utilisé cette méthode pour caractériser la résistance à la fissuration au jeune âge (A.Abusogi and Bakri, 2022; Briffaut, 2010; Ho, 2010; Rong et al., 2021; Zhang et al., 2021).

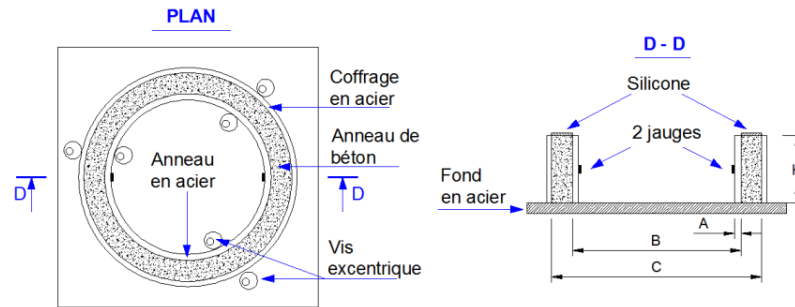


Figure IV-1: Géométrie du dispositif expérimental du ring test selon la norme ASTM C1581 –2004, A=13 mm, B=330 mm, C=406 mm et H=130 mm. Cette photo est récupérée de la thèse de (Ho, 2010)

2.2.2. Essai sur des moules avec surélévations (ASTM C1579 - 2006)

Cette méthode proposée par la norme ASTM C1579 - 2006 consiste à évaluer la fissuration du matériau au jeune âge via un moule présentant des surélévations qui concentrent la contrainte et permettent d'initier la fissuration. La norme ASTM C1579 prescrit l'utilisation d'un moule de $560 \times 355 \times 100 \text{ mm}^3$ avec des surélévations métalliques dont les dimensions et les dispositions dans le moule sont illustrées dans la **Figure IV-2**. Ces essais permettent d'évaluer deux paramètres : l'âge d'apparition de la fissure centrale et son ouverture. Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs (Bertelsen et al., 2019a; Kouta, 2020; Mbemba-Kiele, 2010; Souche, 2015; Turcry, 2004). Chaque auteur a utilisé ce type de moule en modifiant la géométrie de manière à s'adapter à l'étude et à la taille des plus gros granulats en particulier.

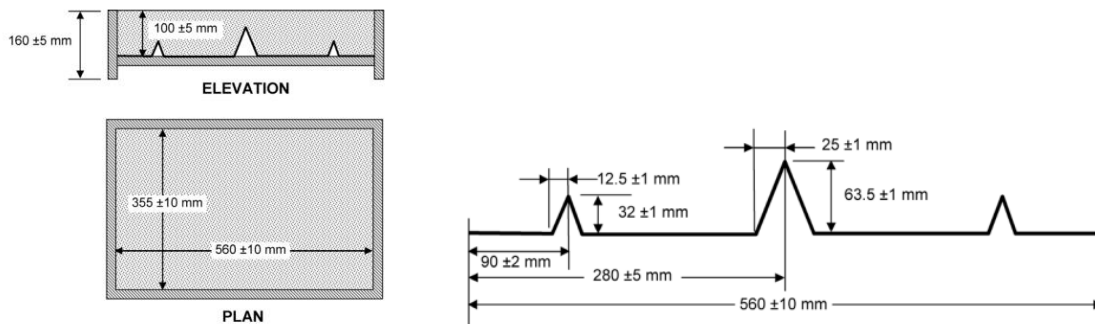


Figure IV-2: Les caractéristiques du moule prismatique et des surélévations métalliques selon la norme (ASTM C1579, 2006)

Le **Tableau IV-1** présente quelques exemples de cette méthode réalisés par différents auteurs en décrivant les dimensions des moules, les conditions imposées (T = Température, HR = Humidité Relative et V_v = Vitesse du vent) et les outils de quantification de la fissuration.

Référence	Dimensions de moules (mm ³)	Conditions	Outil de mesure
(Souche, 2015)	560 x 385 x 114	T : 20 °C HR : 50 % V _v : 8 m/s	Logiciel Image J
(Turcry, 2004)	200 x 200 x 10	T : 20 °C HR : 50 % V _v : 5 m/s	Calque + lentille graduée (±10µm)
(Mbemba-Kiele, 2010)	400 x 200 x 70	T : 20 °C HR : 50 % V _v : 5 m/s	Logiciel d'image
(Kouta, 2020)	560 x 355 x 100	T : 34 °C HR : 33 % V _v : 6 m/s	Logiciel commercial Vic 2D
(Leemann et al., 2014)	560 x 355 x 100	T : 30 °C HR : 60 % V _v : 7 m/s	Loupe et règle graduée
(Meyer and Combrinck, 2022)	100 x 50 x 40	T : 25 °C HR : 50 % V _v : 4,9 m/s	Logiciel traitement d'images
(Boshoff and Combrinck, 2013)	560 x 355 x 100	T : 50 °C HR : 10 % V _v : 19,5 m/s	Logiciel CAD
(Al-Tulaian et al., 2016)	900 x 600 x 100	T : 24 °C HR : 42 % V _v : 4,5 m/s	Microscope

Tableau IV-1 : Les caractéristiques des essais du type ASTM C1579 utilisées par différents auteurs

2.2.3. Essai sur un support adhérent

Le principe de cet essai est de couler le matériau sur un support rigide et adhérent. Au moment du retrait, le support empêche le matériau de se déformer librement ce qui engendre des contraintes en traction et par conséquent un maillage de fissures aura lieu sur toute la surface du matériau testé (**Figure IV-3**). Aujourd'hui, aucune norme n'est disponible pour cadrer le protocole expérimental de ce type d'essai. Il en résulte donc des variations sur plusieurs paramètres : la géométrie des éprouvettes, les conditions de blocage du retrait et les conditions environnementales imposées lors de l'essai. On peut citer : le support avec protubérance sphériques (**Figure IV-4**), le support béton rigide (**Figure IV-5**), le support avec des particules de granulats grossiers sur la partie supérieure pour accentuer le retrait (**Figure IV-6**). Ces essais permettent de déterminer les caractéristiques suivantes : l'âge d'apparition de la fissure, l'ouverture et la surface totale des fissures.



Figure IV-3: Exemple de maillage de fissuration sur support adhérent (Juarez et al., 2015)

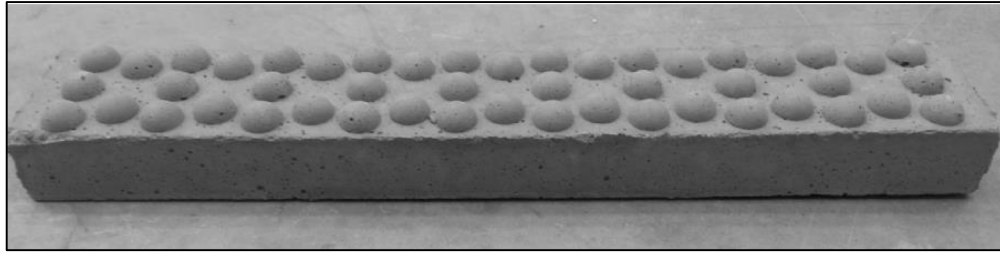


Figure IV-4: Support béton avec protubérances sphériques (Branston et al., 2016)



Figure IV-5: Support en béton rigide (Bertelsen et al., 2019a)



Figure IV-6: Support avec des granulats (Juarez et al., 2015)

Le **Tableau IV-2** illustre quelques exemples de cette méthode réalisés par différents auteurs en décrivant les conditions de blocage du retrait imposées, les dimensions des moules, les conditions imposées et les outils de quantification de la fissuration.

Référence	Support (mm ³)	Mortier (mm)	Adhérence	Conditions	Outils de mesure
(Branston et al., 2016)	40 x 100 x 500	35	Support avec protubérances sphériques	T : 48 ± 2 °C HR : 15 ± 3 %	Microscope
(Booya et al., 2019)	40 x 100 x 550	25		T : 45 ± 2 °C HR : 15 ± 2 %	Microscope
(Banthia and Gupta, 2006)	40 x 95 x 325	60		T : 50 ± 1 °C HR : 5 %	Microscope
(Boghossian and Wegner, 2008)	40 x 95 x 325	60		T : 45 ± 2 °C HR < 3 %	Microscope
(Bertelsen et al., 2019a)	50 x 95 x 418	10	Support adhérent	T : $32 \pm 1,5$ °C HR : $33,5 \pm 5$ %	Corrélation d'images
(Mauroux et al., 2012)	200 x 200 x 200	10		T : $32 \pm 1,5$ °C HR : $33,5 \pm 5$ %	Corrélation d'images
(Juarez et al., 2015)	1000 x 100 x 100	-	Support avec gros granulats	T : 40 ± 2 °C HR : 32 ± 2 %	Microscope

Tableau IV-2: Les caractéristiques des essais sur support adhérent utilisés par différents auteurs

2.2.4. Essai avec blocages périphériques

Cette méthode consiste à évaluer la fissuration du matériau au jeune âge via un moule présentant des tiges localisées sur le bord ou sur le fond (**Figure IV-7**). Ces tiges permettent d'empêcher la contraction du béton, de localiser les contraintes et d'initier la fissuration. Comme les autres méthodes citées ci-dessus, cet essai présente des variantes (localisation, distance entre les tiges, type). L'évaluation de la fissuration se base sur la détermination de l'échéance de la fissuration, la surface totale et l'ouverture des fissures.

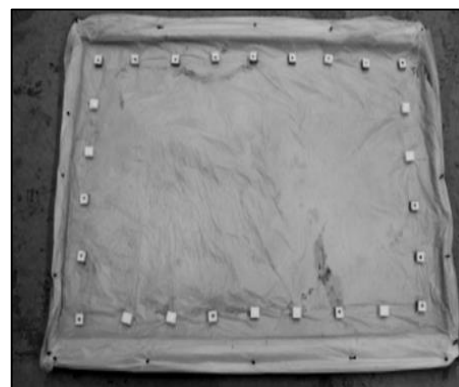


Figure IV-7: Exemple d'essais avec des tiges localisés au bord et au fond des moules (Choi et al., 2014; Ruiz-Ripoll et al., 2013)

Le **Tableau IV-3** présente quelques variantes de cette méthode réalisés par différents auteurs en décrivant les dimensions des moules, les conditions imposées et les outils de quantification de la fissuration.

Référence	Moules (mm ³)	Conditions	Outils de mesure
(Ruiz-Ripoll et al., 2013)	800 x 800 x 100	T : 45 °C HR : 75 %	Microscope
(Kim et al., 2008)	900 x 600 x 150	T : 28 ± 2 °C HR : 40 ± 3 %	Non renseigné
(Ozgur and Khaled, 2010)	840 x 540 x 40	T : 24 -27 °C HR : 60 ± 5 %	Microscope
(Choi et al., 2014)	900 x 600 x 150	T : 28 ± 2 °C HR : 40 ± 5 %	Fil + microscope
(Lee and Won, 2016)	900 x 600 x 150	T : 28 ± 2 °C HR : 40 ± 5 %	Microscope

Tableau IV-3 : Les caractéristiques des moules utilisées par différents auteurs

3. ESSAIS DEVELOPPES

Le dispositif expérimental, décrit dans ce paragraphe, permet l'évaluation de la résistance à la fissuration des mortiers à l'état plastique en conditions environnementales sévères. Le choix s'est porté sur un essai de type « laboratoire » (moule avec surélévations) et un essai de type « conditions réelles » (support adhérent). L'objectif est de quantifier la sensibilité à la fissuration mais aussi de comparer les résultats entre les deux essais.

3.1. Dispositif de mise en conditions sévères

Dans le but d'imposer des conditions d'humidité, de température et de vent qui permettent d'accélérer le séchage des matériaux favorisant l'initiation des fissures, nous avons construit un tunnel ventilé de dimensions 2300 x 825 x 355 mm³ (**Figure IV-8**).



Figure IV-8: Le tunnel ventilé utilisé pour tester la sensibilité à la fissuration au jeune âge

Les conditions sévères à l'intérieur du tunnel sont assurées par l'utilisation de deux ventilateurs chauffants d'une puissance de 3kW. Un troisième ventilateur permet d'accentuer la vitesse de vent donnant des conditions de séchage induisant la fissuration. Pour que les conditions imposées soient suffisantes pour initier la fissuration, la norme ASTM C1579 impose un taux d'évaporation d'eau qui vaut $1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ce qui ne correspond pas à notre cas. En effet, avec les équipements utilisés, on a créé une vitesse de l'air de 1 m.s^{-1} ce qui mène à une évaporation moyenne de $0,71 \pm 0,03 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (**Tableau IV-4**). Pour déterminer le flux d'évaporation massique, la norme suggère d'effectuer la pesée du plan d'eau libre soumis aux conditions sévères imposées. Nous avons réalisé un suivi de la perte en masse sur 3 bacs d'eau pendant 6 heures et le taux d'évaporation a été déterminé en divisant la valeur obtenue par la surface du bac utilisé et l'échéance de la mesure. Cependant, au vu des essais réalisés, ces conditions sont suffisamment sévères pour initier une fissuration ; la campagne a donc été réalisée en conservant une vitesse d'air moyenne inférieure à celle recommandée par la norme ASTM C1579.

	Bac d'eau 1	Bac d'eau 2	Bac d'eau 3
Flux d'évaporation massique ($\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	0,74	0,71	0,68

Tableau IV-4: Flux d'évaporation massique de l'eau dans le tunnel

La **Figure IV-9** montre la configuration finale du tunnel fabriqué avec tous les équipements utilisés. Un capteur d'humidité et de température est placé dans le tunnel pour un suivi précis des conditions de chaque essai. En effet, les conditions pourraient être influencées par celles ambiantes et non contrôlées du laboratoire. Ainsi pour nous permettre une comparaison, pour chaque test, une éprouvette de chaque formulation est présente et les résultats sont exprimés en pourcentage d'écart avec le mortier de référence et non en valeur brute car dépendante des conditions. Etant donné que les ventilateurs sont placés d'un seul côté du tunnel, les éprouvettes sont permutées chaque 10 min pour les soumettre aux mêmes conditions afin que les résultats soient comparables.

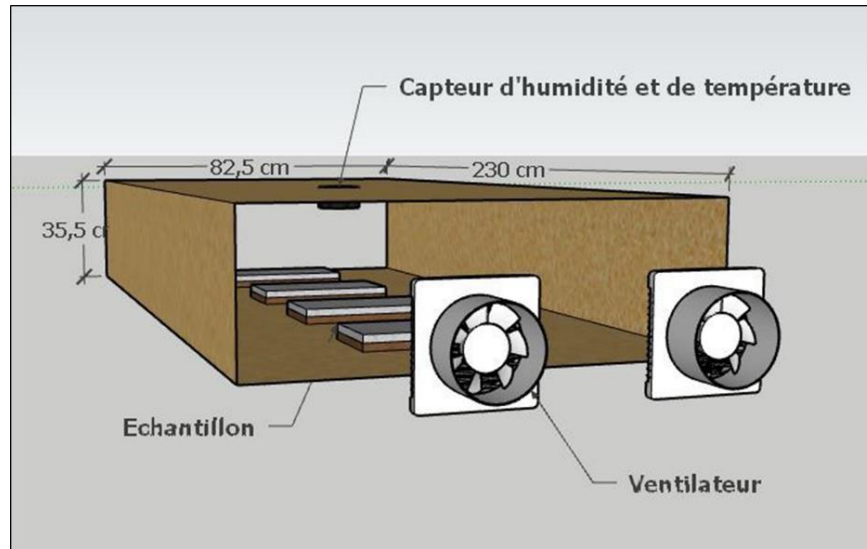


Figure IV-9 : Configuration du tunnel ventilé pour produire des conditions environnementales sévères

3.2. Essais sur moules prismatiques

3.2.1. Caractéristiques de l'essai

Une première méthode a été utilisée dans le but de suivre l'évolution de la fissuration générée dans le matériau cimentaire et pouzzolanique lors d'un retrait empêché. Cet essai consiste à couler le mortier dans un moule métallique avec des surélévations triangulaires dont les critères sont inspirés de la norme ASTM C1579. La géométrie du moule dépend notamment de la taille des plus gros granulats. Dans notre cas, le moule ($50 \times 25 \times 3 \text{ cm}^3$) a été réalisé pour s'adapter aux mortiers. La **Figure IV-10** présente la forme géométrique du moule utilisé et ses dimensions. La grande surélévation centrale est responsable de l'amorce des fissures, tandis que les deux autres plus petites servent à bloquer le retrait du matériau en face inférieure. Les hauteurs ont été choisies en respectant les proportions entre la hauteur totale du moule et la hauteur des surélévations (Ghouchian et al., 2019; Kouta, 2020; Souche, 2015). Le malaxage a été réalisé de la même manière que pour la fabrication du mortier pour l'ensemble des essais et le compactage a été fait en utilisant une table vibrante pendant 10 secondes.

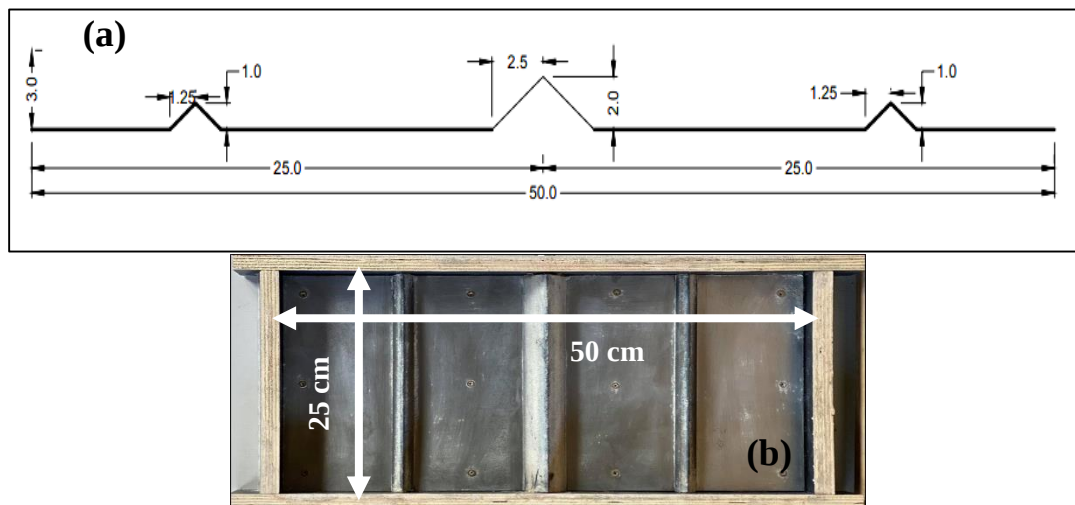


Figure IV-10 : Géométrie du moule fabriqué, (a) les dimensions des surélévations triangulaires, (b) vue de dessus du moule.

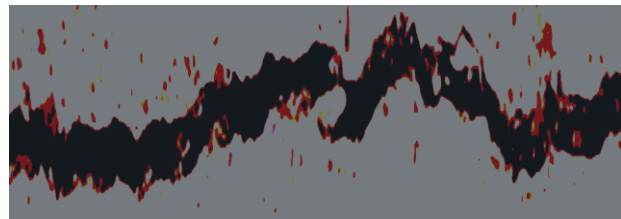
3.2.2. Méthode de mesure de la fissuration

Pour chaque formulation, trois tests ont été réalisés. La fissuration a été évaluée en mesurant l'ouverture moyenne (L_f) de la fissure sur toute la longueur après 6 heures dans le tunnel par traitement image. Pour calculer l'ouverture moyenne de la fissuration, nous avons pris 5 mesures le long de la fissure pour chaque formulation. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes pour mesurer l'ouverture de la fissure (Banthia and Gupta, 2006; Boshoff and Combrinck, 2013; Ghourchian et al., 2019; Kouta, 2020; Kouta et al., 2020; Souche, 2015; Turcry, 2004). Notre méthode de mesure a été inspirée de celle utilisée par (Leemann et al., 2014; Turcry, 2004). Les auteurs ont utilisé une lentille et une règle graduée. Dans notre étude, on a créé une règle numérique graduée dont chaque graduation représente 0,05 mm pour une valeur maximale de mesure de 2 mm. La **Figure IV-11** présente la procédure suivie pour mesurer l'ouverture de la fissure.

Photo de la partie centrale du moule



Amélioration de la qualité d'image
(luminosité et contraste)



Zoom sur la fissure et positionnement de la règle numérique graduée sur l'ouverture de la fissure. Plusieurs mesures ont été prises sur toute la longueur de fissures.

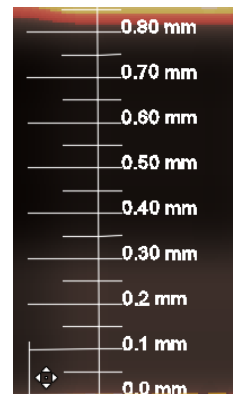


Figure IV-11: Procédure de mesure de l'ouverture de la fissure (essai sur moule avec surélévation)

Ensuite, la fissuration a été évaluée en déterminant le coefficient de réduction de l'ouverture de fissure (CRR1) calculé d'après l'**Équation IV-1** :

$$\text{CRR1 (\%)} = \left(1 - \frac{L_f}{L_{nf}}\right) \times 100 \quad \text{Équation IV-1}$$

Avec : L_f ouverture moyenne de la fissure du mortier fibré
 L_{nf} ouverture moyenne de la fissure du mortier de référence

3.2.3. Résultats obtenus

Cette méthode a été appliquée à toutes les formulations pouzzolaniques et cimentaires.

Le **Tableau IV-5** présente un exemple de la fissuration obtenue sur toutes les formulations pouzzolaniques et cimentaires.

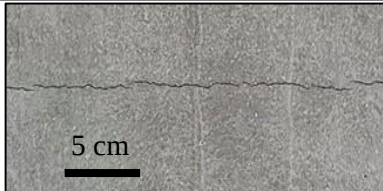
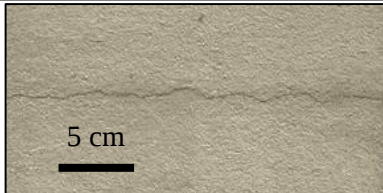
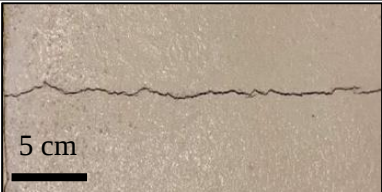
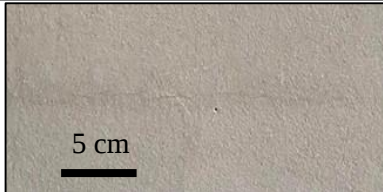
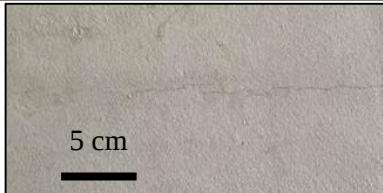
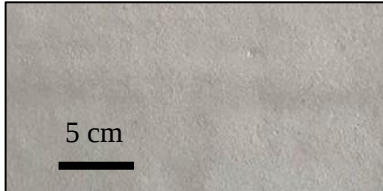
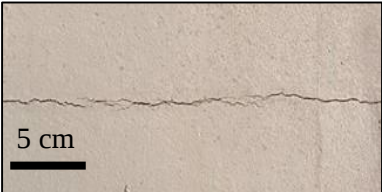
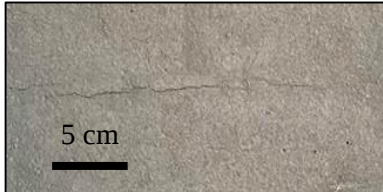
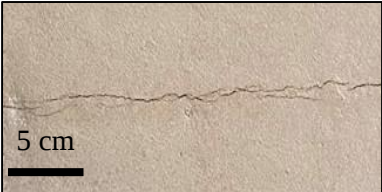
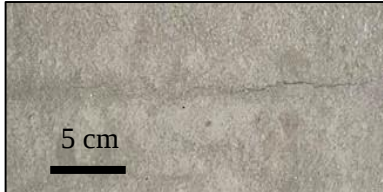
Fibres	Teneur en fibres (%)	Pouzzolanique	Cimentaire
Non fibré	0		
	0,25		
	0,5		
Lin	0,5		
	1		
Chanvre	0,5		
	1		

Tableau IV-5: Un exemple de la fissuration obtenue pour les formulations pouzzolaniques et cimentaires testées

Visuellement, on peut constater que CNF et PNF sont caractérisés par une grande ouverture de fissure par rapport aux formulations fibrées. Concernant les mortiers renforcés par les fibres, on peut

mentionner une réduction de l'ouverture de fissure pour toutes les formulations mais cette baisse est plus marquée pour les mortiers renforcés par des fibres végétales. De plus, on peut mettre en évidence l'effet du dosage des fibres sur le développement de la fissure. En effet, quel que soit le type de fibre, un dosage double s'avère plus efficace pour limiter la fissuration. Les résultats obtenus montrent que les fibres de lin sont plus efficaces sur la diminution de la fissure par rapport aux fibres de chanvre et polypropylène

Les **Figure IV-12** et **Figure IV-13** présentent le CRR1 pour toutes les formulations pouzzolaniques et cimentaires testées à plusieurs dosages et avec une longueur de fibres visée de 12 mm. Le CRR1 est calculé par rapport au mortier non fibré du test.

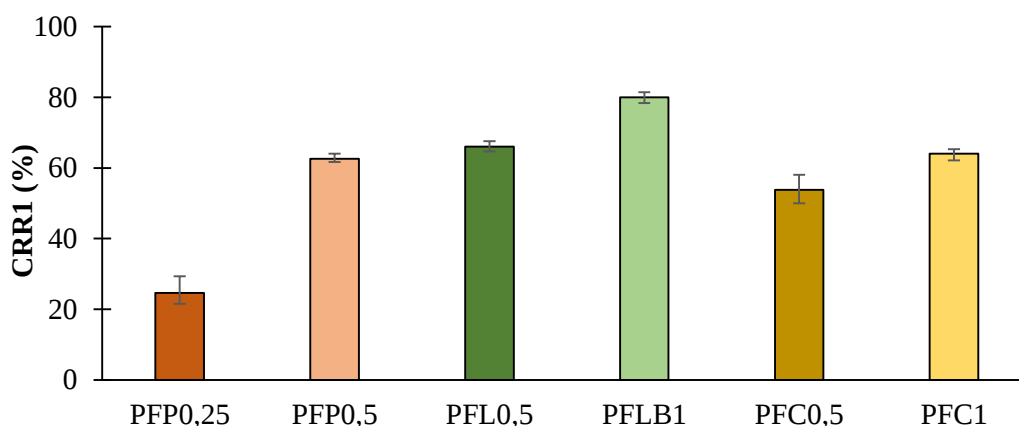


Figure IV-12: Le CRR1 des formulations pouzzolaniques fibrées (essais sur moules avec surélévations)

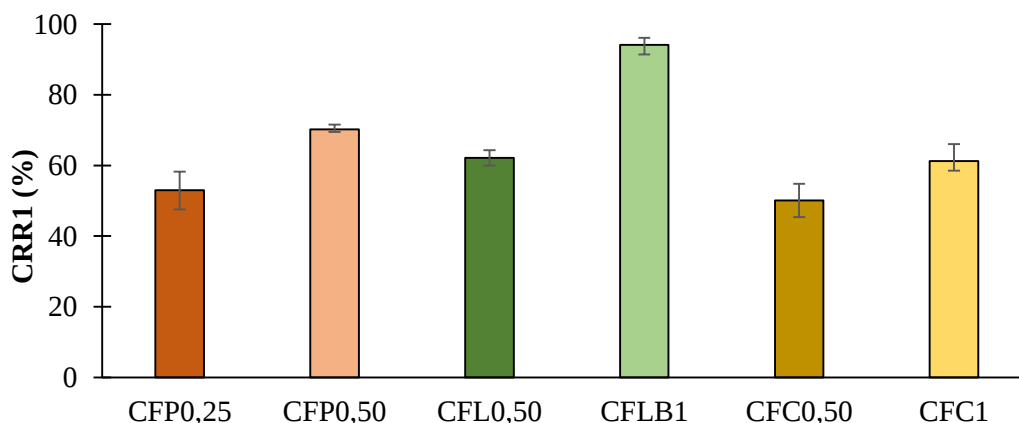


Figure IV-13: Le CRR1 des formulations cimentaires fibrées (essais sur moules avec surélévations)

Quantitativement, les résultats obtenus confirment nos observations visuelles et montrent une nette réduction de l'ouverture de fissure pour tous les mortiers fibrés. Le type et le dosage de fibres sont deux paramètres importants qui gouvernent l'efficacité des fibres sur la sensibilité à la fissuration du mortier. Les résultats de cette méthode montrent que les fibres de lin ont été plus efficaces que les fibres de chanvre. Le CRR1 varie entre 64 et 68% pour PFL0,5, entre 50 et 56% pour PFC0,5. Pour CFL0,5, le CRR1 est de 60-64% et 45-55% pour CFC0,5. Cette réduction augmente lorsque l'on double le dosage en fibres. Pour PFLB1 et PFC1, le CRR1 est de 78-82 % et 62-66% respectivement. Pour les formulations cimentaires, la réduction varie entre 92 et 96% pour CFLB1 et entre 56 et 63% pour CFC1. Cette différence met en évidence le rôle de l'homogénéité de longueur de fibres sur le contrôle de l'ouverture de fissure. En effet, dans cette méthode la fissuration est localisée dans la partie centrale du moule. L'étude granulométrique réalisée sur les fibres de chanvre a montré une grande dispersion de longueur (40% qui varie entre 10 et 15 mm, 40 % >15 mm et 20 % < 10 mm), on peut lier cette différence au niveau de CRR1 à la qualité d'ancrage fibres/matrice. Les fibres de lin (longueur entre 10

et 15 mm >80%), cette fourchette de la longueur semble être efficace pour assurer un bon ancrage entre la fibre et la matrice d'où une meilleure redistribution des contraintes et la diminution de l'ouverture de fissure. Pour les mortiers renforcés par des fibres polypropylènes, la réduction varie entre 20 et 27% pour PFP0,25 et entre 47 et 58% pour CFP0,25. Comme le cas des fibres végétales, cette réduction augmente avec un dosage double de fibres. Pour PFP0,5, le CRR1 peut aller jusqu'à 63% et jusqu'à 70% pour CFP0,5.

Effet du prétraitement des fibres de lin sur la sensibilité à la fissuration du mortier au jeune âge

On a mesuré l'ouverture de la fissure entre les mortiers renforcés par des fibres de lin brut et traité. Le **Tableau IV-6** montre un exemple de fissuration obtenue et le **Tableau IV-7** comporte les valeurs de CRR1 obtenues.

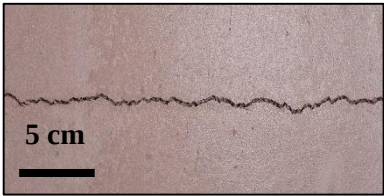
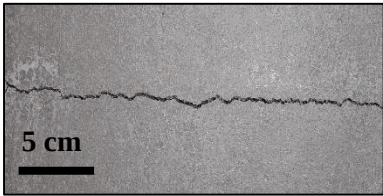
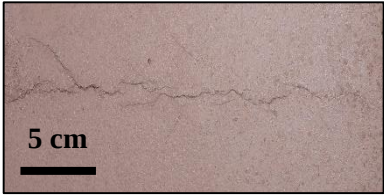
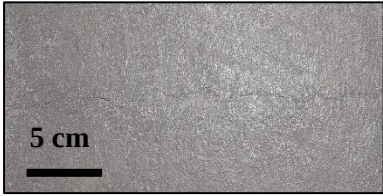
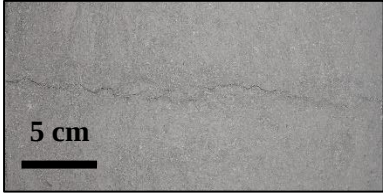
Fibres	Pouzzolanique	Cimentaire
Non fibré		
Lin brut (1%)		
Lin traité (1%)		

Tableau IV-6: Un exemple de la fissuration obtenue pour les formulations pouzzolaniques et cimentaires non fibrées, avec fibres de lin brut et traité

Formulations	CRR1 (%)	Formulations	CRR1 (%)
PFLB1	80 ± 2	CFLB1	94 ± 2
PFLT1	71 ± 5	CFLT1	88 ± 2

Tableau IV-7: Le CRR1 des formulations renforcées par les fibres de lin brut et traité.

On peut noter que le traitement réalisé sur les fibres de lin diminue légèrement les valeurs de CRR1 entre les formulations. Pour PFLB1, le CRR1 est 80% et 71% pour PFLT1. Pour les formulations cimentaires, on a relevé une réduction de 94% pour CFLB1 et 88% pour CFLT1. Les résultats confirment que la capacité d'absorption d'eau par les fibres permet d'améliorer la résistance à la traction du mortier au jeune âge en améliorant la liaison fibre/matrice (Bertelsen et al., 2019; Ghourchian et al., 2019).

3.3. Essai sur support adhérent en brique

3.3.1. Caractéristiques de l'essai

Cette méthode consiste à couler un mortier de 2 cm d'épaisseur sur un support en brique ($38,5 \times 20,5 \times 4 \text{ cm}^3$) (**Figure IV-14**) (**Figure IV-15**) afin de travailler dans des conditions proches de la réalité (Bertelsen et al., 2019a). Le support en brique a été maintenu pendant 7 jours dans une enceinte climatisée avec une température de 20°C et une humidité relative de 50 % pour stabiliser les conditions du support entre les essais. Le malaxage a été réalisé de la même manière que tous les essais avec un changement au niveau du compactage du matériau. Le matériau est coulé sur le support brique dans un moule en bois contreplaqué filmé, puis la mise en place est réalisée à l'aide d'une table vibrante pendant 10 secondes. Les éprouvettes (brique + mortier) sont alors placées directement dans le tunnel.

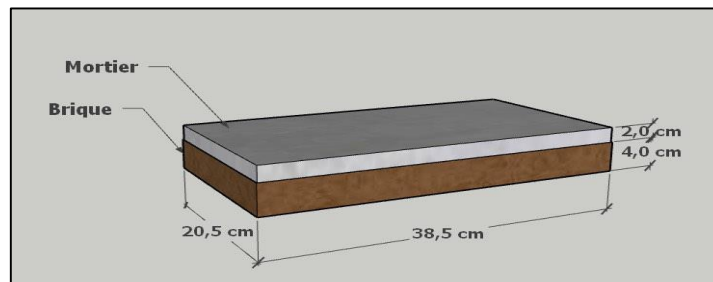


Figure IV-14: Dimensions de la brique et du rechargement en mortier



Figure IV-15: Illustration d'un échantillon de mortier sur la brique

3.3.2. Méthode de mesure de la fissuration

Pour chaque formulation, trois tests ont été réalisés. Afin d'évaluer l'effet des fibres sur la sensibilité à la fissuration due au retrait empêché, la surface totale des fissures après 6 heures dans le tunnel a été déterminée en s'appuyant sur une photographie de la surface. Cette image est ensuite traitée via un algorithme spécifique développé sur MATLAB dans notre laboratoire. En ce qui concerne la segmentation des images en niveaux de gris, l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) a été mis en œuvre (Gaël et al., 2016). Développée par Kennedy et Eberhart (Kennedy and Eberhart, 1995), la méthode de segmentation a été employée sous une forme améliorée. En plus de l'algorithme PSO, un grand nombre de filtres et de calculs statistiques ont été ajoutés pour augmenter la précision de la détection des fissures : ajustement de l'arrière-plan, morphologie, filtrage sur le facteur de circularité et la surface minimale. Après ces étapes, l'image comporte deux couleurs (noir et blanc). Un traitement manuel est alors nécessaire pour enlever les artefacts et être plus proche de la fissuration réelle. Finalement, l'image est analysée sur MATLAB pour obtenir les nombres de pixels noirs et blancs.

Les différentes étapes de l'analyse sont résumées dans la **Figure IV-16**. Ce travail a permis de caractériser quantitativement la surface totale des fissures en utilisant la fraction des pixels blancs et noirs de l'image finale.

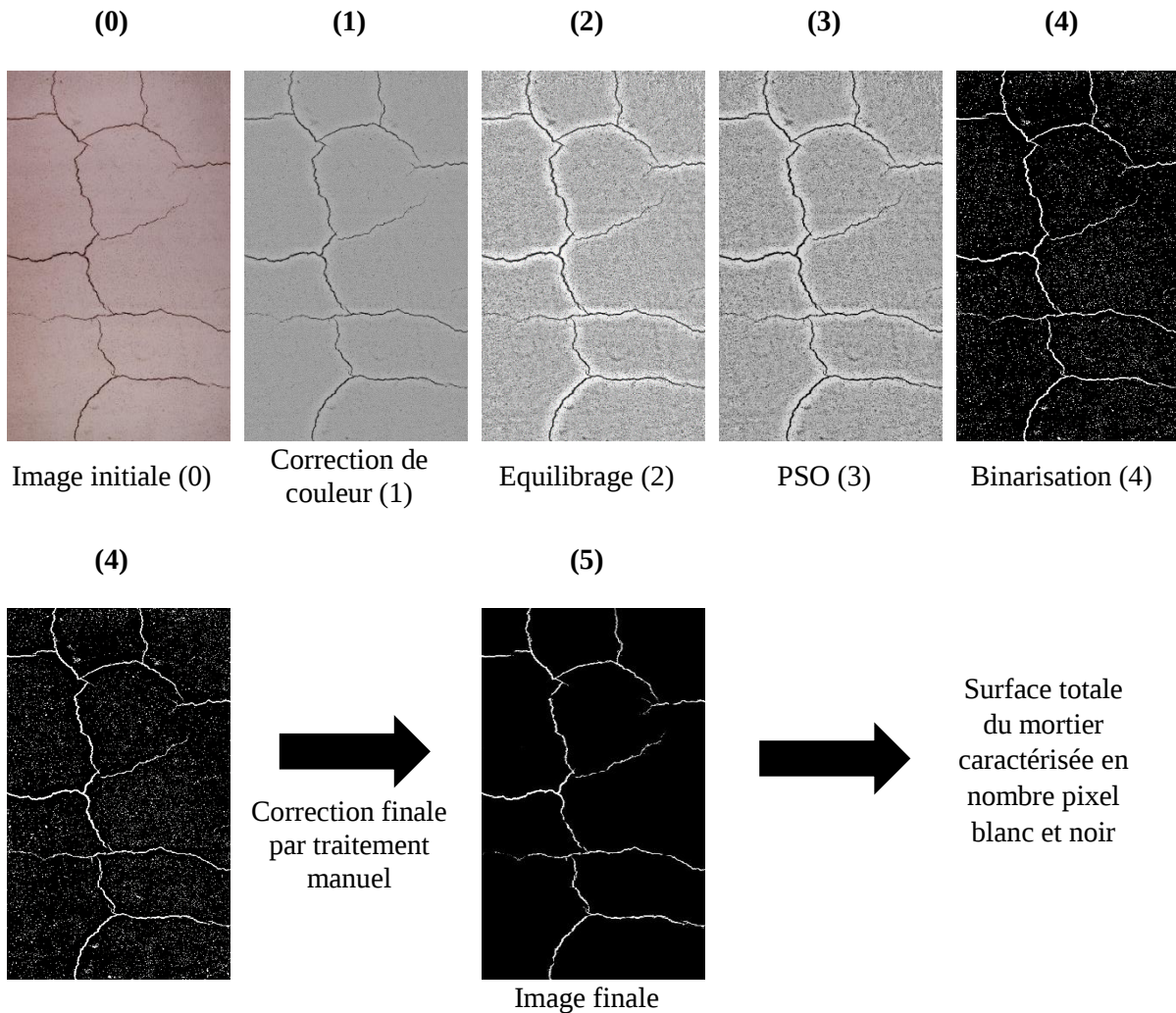


Figure IV-16: Les étapes de l'analyse d'images pour caractériser la fissuration du mortier

Après ce traitement, la fissuration a été évaluée en déterminant le coefficient de réduction de la surface des fissures (CRR2) pour chaque test en utilisant l'**Équation IV-2** :

$$\text{CRR2 (\%)} = \left(1 - \frac{A_f}{A_{nf}}\right) \times 100 \quad \text{Équation IV-2}$$

Avec :

- A_f surface de fissuration du mortier fibré
- A_{nf} surface de fissuration du mortier non fibré

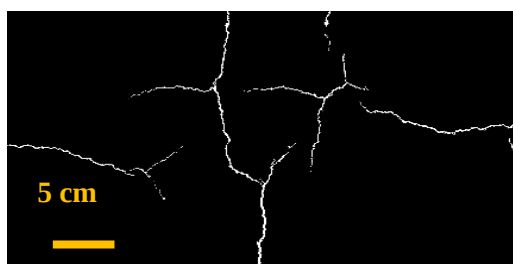
3.3.3. Résultats obtenus

Cette méthode de caractérisation a été appliquée seulement aux mortiers pouzzolaniques car le taux d'évaporation combiné au support utilisé n'a pas permis la fissuration des formulations cimentaires.

La **Figure IV-17** présente un exemple de la fissuration obtenue sur toutes les formulations pouzzolaniques testées. Visuellement, on peut observer un maillage de fissuration clair avec une densité élevée pour PNF. Dans le cas des mortiers fibrés, l'ouverture des fissures est clairement réduite. Cette diminution est plus importante dans le cas des mortiers renforcés par les fibres végétales. On peut

mentionner que dans le cas de PFP0,25, un nombre des fissures un peu plus important a été obtenu mais le maillage observé est plus fin ce qui montre une réduction de l'ouverture des fissures.

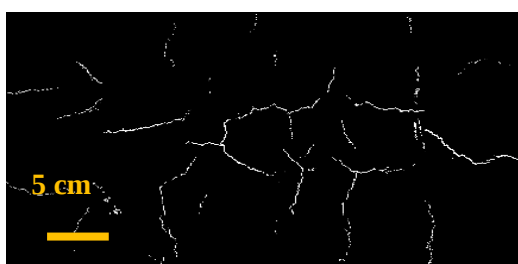
Référence non fibré



0,25 %

Fibres de polypropylène

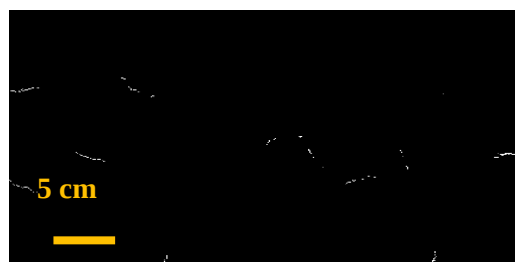
0,5 %



0,5 %

Fibres de lin

1 %



0,5 %

Fibres de chanvre

1 %

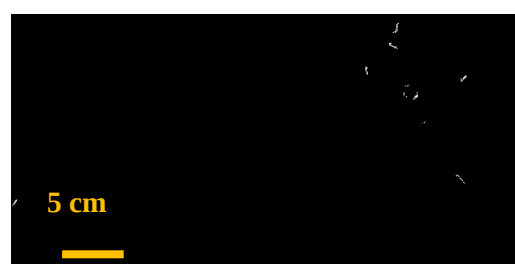
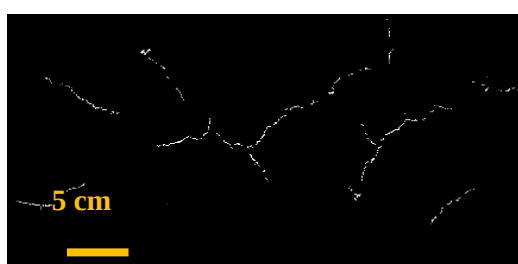


Figure IV-17: Un exemple de maillage de la fissuration obtenue pour les formulations pouzzolaniques testées sur le support brique

La Figure IV-18 présente le CRR2 pour toutes les formulations pouzzolaniques testées.

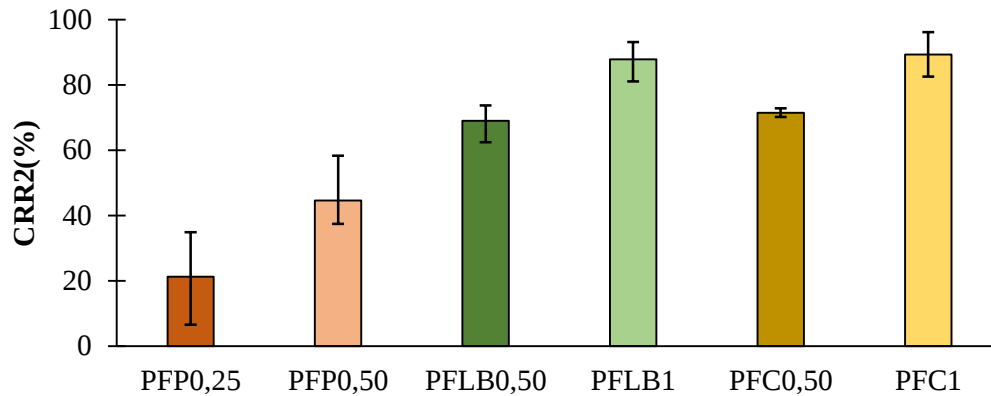


Figure IV-18: Le CRR2 des formulations pouzzolaniques

Tout d'abord, on peut observer une réduction de la fissuration pour toutes les formulations fibrées mais cette réduction dépend de deux paramètres : la nature de fibres et le dosage. Pour les formulations renforcées par les fibres de lin et de chanvre, la réduction de la fissuration est similaire. Pour PFLB1 et PFC1, le CRR2 varie entre 80 et 90% et entre 60 et 75% pour PFLB0,5 et PFC0,5. Pour les mortiers renforcés par les fibres polypropylènes, on a noté une réduction de la fissuration moins importante qu'avec des fibres végétales. Pour PFP0,25, le CRR2 varie entre 10 et 40% et entre 40 et 60% pour PFP0,5.

Les résultats obtenus permettent de poser la question suivante :

Pourquoi les fibres végétales sont plus efficaces que les fibres polypropylènes pour réduire la sensibilité à la fissuration au jeune âge ?

Tout d'abord, on peut mentionner une efficacité pour toutes les fibres sur l'amélioration de la résistance à la fissuration des composites au jeune âge. Cependant, les résultats obtenus suggèrent que les différents types de fibres agissent sur la fissuration par des mécanismes différents. Les fibres confèrent une certaine capacité à transférer les contraintes à travers la discontinuité du matériau et contrôlent ainsi l'ouverture de la fissure comme l'on peut le constater sur la **Figure IV-17**. Pour les formulations renforcées par les fibres polypropylènes, on a constaté un maillage de fissures plus dense que celui du mortier non fibré mais avec une ouverture plus fine. Ces différentes observations mettent en évidence que les contraintes de traction engendrées par le retrait empêché ont induit la formation d'un nombre plus important de fissures ce qui suggère que la résistance à la traction d'une zone fissurée dépasserait celle du mortier non fissuré. Ces conclusions ont été mentionnées par plusieurs auteurs (Bertelsen et al., 2020, 2019a; Boghossian and Wegner, 2008).

S'agissant de formulations renforcées par les fibres de lin et de chanvre, les résultats observés ont montré que le nombre de fissures et leurs dimensions ont été diminués d'une manière significative. Selon (Boghossian and Wegner, 2008), cette réduction pourra être liée à la capacité de déformation des mortiers renforcés par les fibres végétales qui est plus grande que celle des mortiers avec les fibres polypropylènes. En effet, l'interface fibre-matrice répond à deux mécanismes : chimique et mécanique (Bertelsen et al., 2020; Peled et al., 2008). Le premier est lié au caractère hydrophile des fibres végétales qui implique des réactions chimiques entre les fibres et les grains de liant (Ghourchian et al., 2019; Peled et al., 2008). Ces réactions chimiques induisent une mobilisation plus importante pour les grains de liant ce qui rend le matériau plus déformable. En effet, un matériau plus déformable ne signifie pas qu'il est moins résistant : c'est le contraire. Dans le chapitre III, nous avons relevé une augmentation du retrait plastique du mortier en présence des fibres végétales ce qui confirme que ces fibres rendent le matériau plus déformable. Concernant le mécanisme mécanique, on peut mettre en évidence la résistance à la traction des fibres qui est plus importante que la matrice au jeune âge. Une fois la microfissure présente, les fibres interviennent pour prendre une partie des contraintes ce qui donne au matériau une capacité

en traction plus importante. Bien que ces hypothèses soient raisonnables, elles doivent encore être confirmées par des tests supplémentaires visant à mesurer directement la transmission d'effort par les fibres dans les mortiers frais. Dans ce cadre un complément d'études par des essais d'arrachement est recommandé.

Effet de la longueur des fibres sur la sensibilité à la fissuration du mortier au jeune âge

Afin de mettre en évidence l'influence de la longueur des fibres sur la fissuration des mortiers au jeune âge, on a réalisé des tests sur PFP0,5 et PFLB1 avec une longueur de 6 mm. La **Figure IV-19** et la **Figure IV-20** illustrent une comparaison entre ces formulations avec deux longueurs différentes (6 et 12 mm).

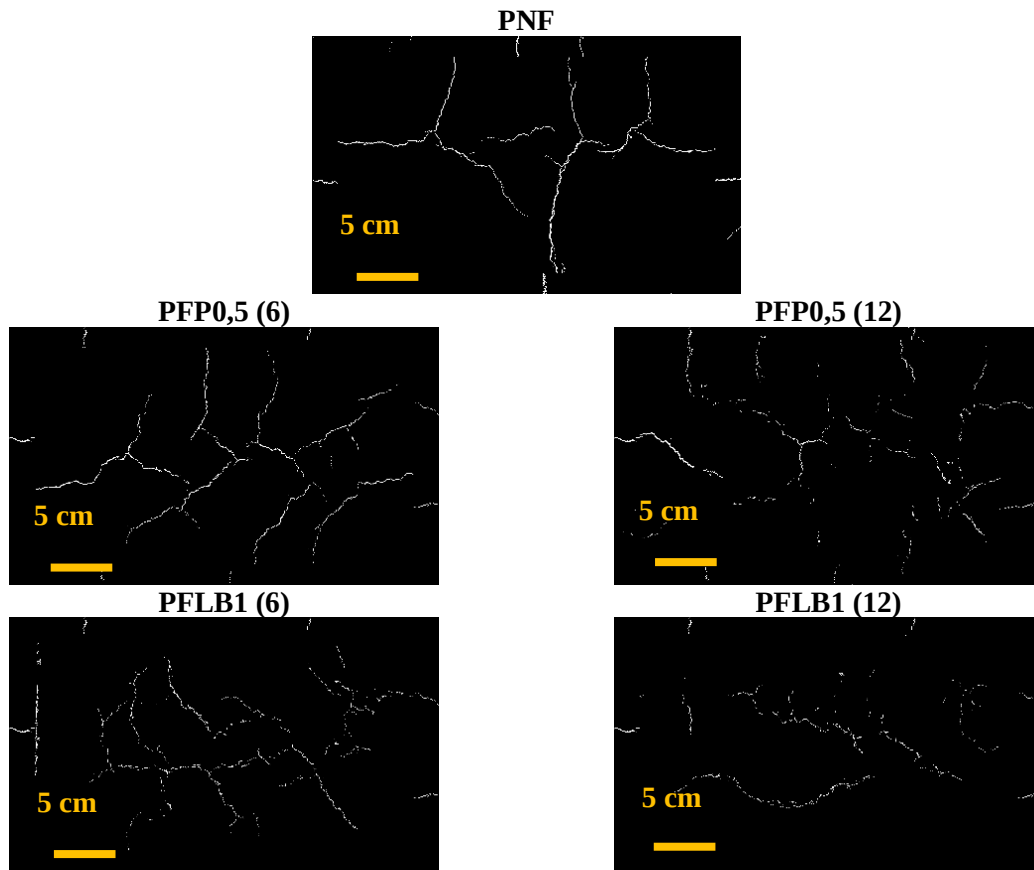


Figure IV-19: Un exemple de maillage de la fissuration obtenue pour les formulations pouzzolaniques testées sur le support brique avec fibres de 6 et 12 mm

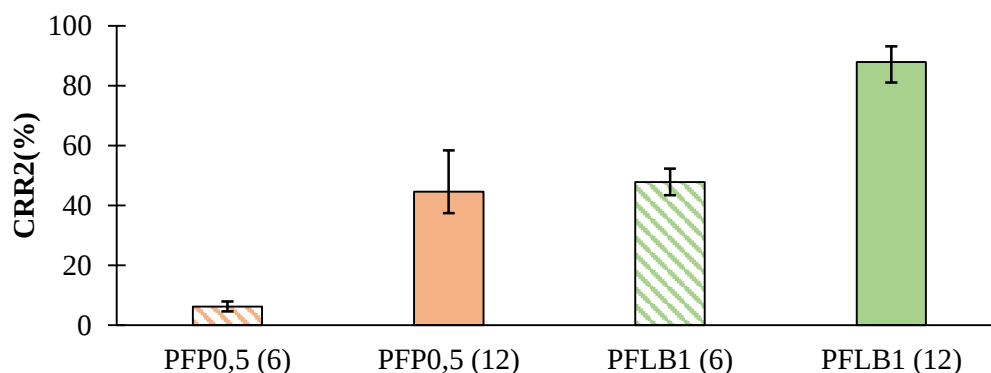


Figure IV-20: Comparaison du CRR2 des formulations pouzzolaniques avec une longueur de fibres de 6 et 12 mm.

En se référant sur la **Figure IV-19** et la **Figure IV-20**, on peut noter une influence de la longueur des fibres sur la sensibilité à la fissuration des mortiers. En effet, le maillage de PFP0,5 (6) et PFLB1(6) présente plus de fissures que les formulations avec 12 mm. Le CRR2 du PFP0,5 (6) varie entre 5 et 8% tandis que pour PFP0,5 (12) le CRR2 varie entre 40 et 60%. Pour les formulations renforcées par les fibres de lin, on note un CRR2 qui varie entre 42 et 52% pour PFLB1(6) et entre 78 et 85% pour PFLB1 (12). On peut observer aussi que le CRR2 obtenu pour PFP0,5 (12) est équivalent à celle obtenu pour PFLB1(6). Donc, 1% de fibres de lin avec une longueur de 6 mm pourra se substituer à 0,5% de fibres polypropylènes de 12 mm pour réduire la sensibilité à la fissuration du mortier pouzzolanique au jeune âge. La différence observée au niveau de CRR2 peut être liée à une longueur d'ancrage insuffisante de la fibre dans la matrice. En effet, pour les 2 types de fibres et avec une longueur de 6 mm, on a mentionné une diminution de CRR2 ce qui reflète une longueur insuffisante pour assurer un bon transfert des charges à travers les fissures. Dans la littérature, il existe des désaccords sur l'influence de la longueur des fibres. Certaines études ont indiqué que des fibres plus longues ont permis d'améliorer la résistance à la fissuration (Al-Tulaian et al., 2016; Banthia and Gupta, 2006; Borg et al., 2016), tandis que d'autres ont trouvé que l'influence de la longueur des fibres était très faible (Bertelsen et al., 2019a; Juarez et al., 2015). Selon (Banthia and Gupta, 2006), la longueur dépend du type de fibre utilisé. Les auteurs ont expliqué que les fibres ayant une mauvaise liaison avec la matrice nécessite une longueur de fibres plus grande pour obtenir un ancrage suffisant dans la matrice. On peut conclure que, dans notre étude, les fibres végétales ayant une longueur de 12 mm sont plus efficaces pour diminuer la sensibilité à la fissuration au jeune âge.

Effet du prétraitement des fibres de lin sur la sensibilité à la fissuration du mortier au jeune âge

Pour savoir si le prétraitement réalisé sur les fibres de lin a une influence sur la fissuration des mortiers au jeune âge, on a réalisé des essais entre PNF, PFLB1 et PFLT1. Le **Tableau IV-8** présente le maillage de fissuration obtenu et montre aussi les valeurs de CRR2 correspondantes.

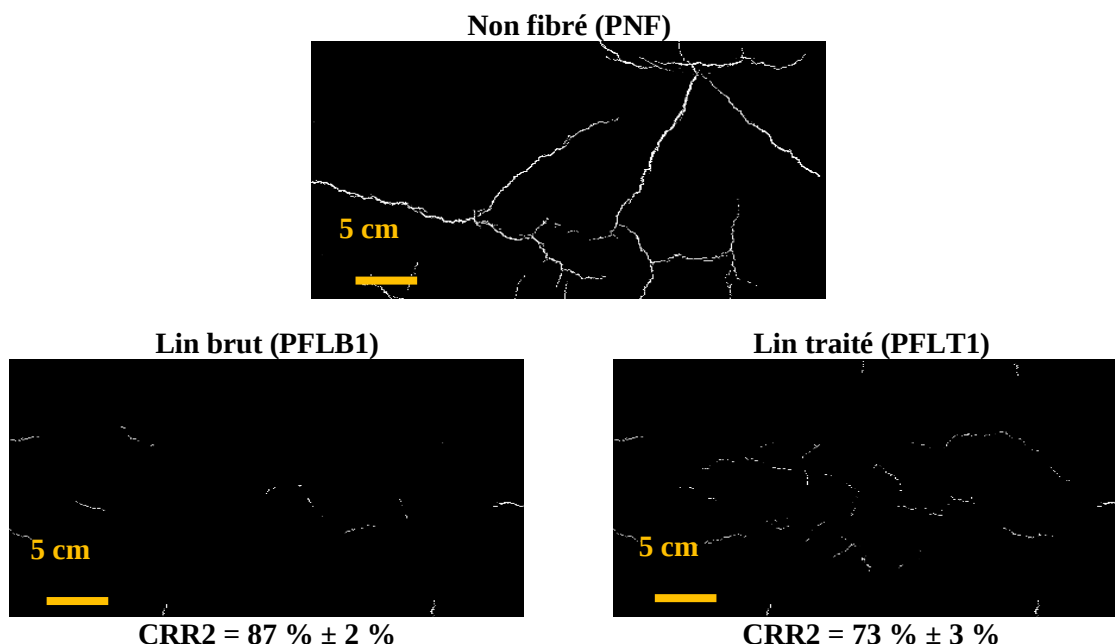


Tableau IV-8: Un exemple de maillage de la fissuration obtenue pour les formulations pouzzolaniques avec le CRR2 correspondant pour les fibres de lin brut (PFLB1) et traité (PFLT1)

On a montré précédemment que le traitement réalisé sur les fibres de lin a permis de réduire sa capacité d'absorption d'eau de 150 à 125%. En se référant aux résultats obtenus sur les essais de la fissuration, on peut noter une légère diminution de CRR2. Le CRR2 est de 87% pour PFLB1 et 73% pour PFLT1. On peut donc mettre en évidence l'importance du caractère hydrophile des fibres végétales au jeune âge. On a déjà mentionné que l'affinité des fibres végétales envers l'eau peut améliorer la

liaison entre la fibre et la matrice donc une diminution du coefficient d'absorption d'eau signifie une modification au niveau de l'interface fibre/matrice qui peut expliquer la différence trouvée ici.

4. ESSAI COMPLEMENTAIRE : LA PERTE DE MASSE

La perte en masse du matériau est considérée comme un paramètre qui peut affecter le retrait au jeune âge (Briffaut, 2010; Kouta et al., 2020; Souche, 2015; Turcry, 2004). Un suivi de l'évolution de la masse à l'état frais est indispensable pour savoir si la présence de fibres pourra modifier la perte de masse au cours du temps. Le suivi a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 11 cm de diamètre et 4 cm de hauteur. Les formulations de référence, celles renforcées par 0,5% de fibres polypropylènes et 1% de fibres de lin ont été retenues dans cette partie. On a testé 3 échantillons pour chaque formulation qui ont été soumis aux conditions sévères dans le tunnel ventilé. La perte de masse est exprimée en % et elle est déterminée par :

$$\text{Perte en masse (\%)} = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad \text{Équation IV-3}$$

Avec : m_0 masse du matériau à $t = 0$
 m_t masse du matériau à l'instant t

La perte de masse pour les formulations pouzzolaniques et cimentaires est présentée dans la **Figure IV-21**.

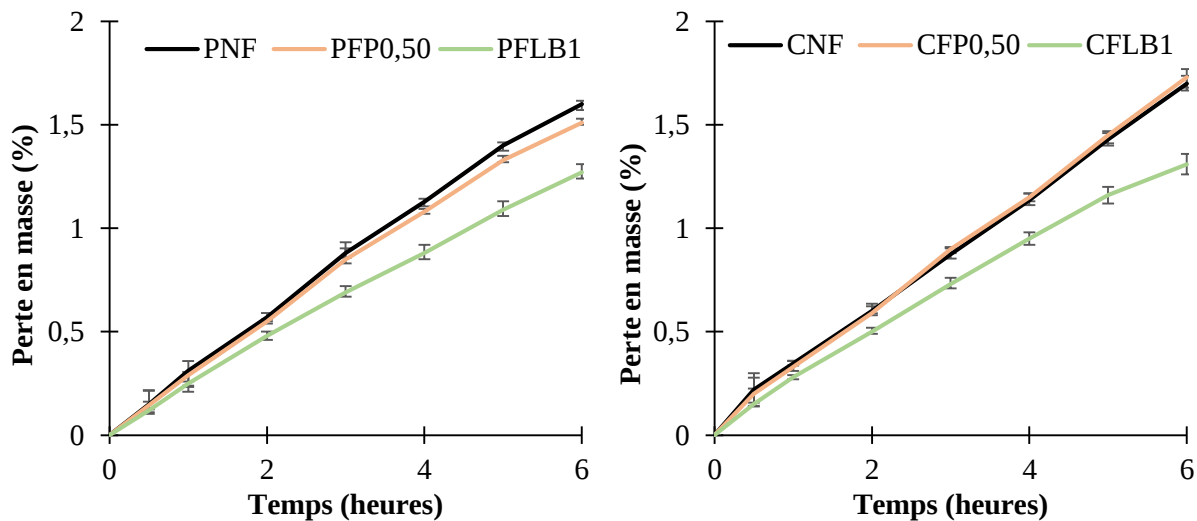


Figure IV-21: La perte en masse des formulations pouzzolaniques et cimentaires pendant les 6 premières heures (en conditions sévères)

Les résultats montrent que la masse de toutes les formulations diminue régulièrement au cours du temps. Mais on peut aussi noter que la perte en masse du PFLB1 et CFLB1 évolue d'une manière plus lente que celle du PNF, CNF et PFP0,5 et CFP0,5 qui ont subi presque la même évolution au cours du temps. Pour les formulations de référence (CNF, PNF) et celles qui sont renforcées par des fibres de polypropylènes (PFP0,5 et CFP0,5), la perte de masse après 6 heures est égale à 1,6 et 1,7% respectivement alors que la perte en masse pour PFL1 et CFL1 est de 1,3% (-20% par rapport au mortier de référence). Des travaux antérieurs arrivent à des conclusions contradictoires sur l'évolution de la perte en masse. Selon (Banthia and Gupta, 2006; Bertelsen et al., 2020), la perte en masse est liée aux conditions environnementales ainsi qu'à la capacité d'absorption d'humidité des différents éléments qui constituent le matériau. Selon (Sayahi et al., 2019), l'addition de fibres végétales induit une réduction

de la quantité d'eau de ressuage grâce à une réduction de la ségrégation, ce qui justifie une valeur plus faible de la perte en masse. Selon (Bertelsen et al., 2020), une augmentation de la perte en masse a été mentionnée. Selon les auteurs, cette augmentation peut être liée au développement des canaux de ressuage le long des fibres.

Les résultats de notre étude montrent une diminution de la perte en masse par l'addition de fibres végétales qui pourrait être liée aux propriétés hydrophiles des fibres éventuelles responsables de la rétention d'eau et de la réduction de la ségrégation, donc de la quantité d'eau de ressuage sur la surface du mortier. En revanche, même si l'hypothèse considérée est raisonnable, il faut prendre en compte que l'eau retenue par les fibres et ensuite relarguée ne sera pas forcément perdue car cette quantité d'eau peut être mobilisée pour la poursuite de l'hydratation du mortier.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet d'un renfort par des fibres de polypropylène et végétales sur la sensibilité à la fissuration due au retrait empêché.

Premièrement, une étude bibliographique a été réalisée sur les différents moyens qui permettent de quantifier la fissuration du matériau au jeune âge.

Deuxièmement, le programme expérimental a été détaillé. Une description du banc expérimental, un tunnel conçu et fabriqué spécifiquement pour créer des conditions sévères favorisant la fissuration, a été abordée suivi par une présentation des différents tests réalisés (essai classique de laboratoire et test sur prototype).

Troisièmement, l'effet de l'incorporation des fibres végétales et polypropylènes sur le comportement du mortier au jeune âge a été étudié. L'évolution de la perte en masse au cours du temps a été mesurée parallèlement aux essais de fissuration pendant 6 heures.

Les résultats de ce chapitre ont permis de tirer les conclusions suivantes.

- l'ajout de fibres, et quel que soit son type, permet de diminuer la sensibilité à la fissuration du mortier au jeune âge.
- les fibres végétales sont plus efficaces que les fibres polypropylènes sur la réduction de cette sensibilité.
- les valeurs des coefficients de réduction de fissuration (CRR1 et CRR2) augmentent avec l'augmentation du dosage en fibres.
- la longueur de la fibre est importante pour assurer un bon ancrage de la fibre dans la matrice ; une fibre courte semble être insuffisante pour assurer une bonne interface car elle pénalise le transfert des contraintes à travers la fissure. Il apparaît donc nécessaire d'identifier une longueur de fibre optimale.
- le caractère hydrophile de la fibre peut améliorer la liaison fibre/matrice au jeune âge et par conséquent diminuer la sensibilité à la fissuration.
- le bénéfice d'un renfort par des fibres végétales au jeune âge pourrait résulter à la fois d'une amélioration de la déformabilité du composite et d'une reprise des efforts dès la microfissuration via une bonne liaison fibre/matrice.
- il a aussi été observé une bonne corrélation entre les deux essais de sensibilité à la fissuration réalisés. Les deux techniques présentées apparaissent fiables pour quantifier cette propriété des mortiers.

Chapitre V. Comportement des mortiers à l'état durci

1. INTRODUCTION

La caractérisation mécanique a porté sur la détermination de la résistance à l'impact car, comme on l'a précisé au chapitre I, un de apports attendu d'un renfort par des fibres de polypropylène est la diminution de la fragilité du matériau vis-à-vis des chocs. Dans ce cadre, un essai spécifique a été développé dans notre laboratoire. Il consiste à lâcher une bille métallique sur une plaque de mortier et de calculer l'énergie nécessaire pour l'initiation de la première fissure et l'énergie qui provoque la rupture de la plaque. Pour que les résultats soient fiables et indépendants de la manipulation de l'utilisateur, nous nous sommes appuyés sur un paramètre qui dépend de l'état de fissuration de la plaque, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le mortier. Par la suite, dans le but d'enrichir la carte d'identité mécanique du composite, des essais de flexion et de compression ont été réalisés sur des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ à plusieurs échéances : 1, 7, 28 et 180 jours. La caractérisation physique a porté sur les mesures de porosité à l'eau à 28 jours. Une dernière partie a été consacrée à la caractérisation microstructurale. Les analyses sont basées sur les images MEB qui permettent d'évaluer notamment l'état de l'interface fibre-matrice.

Dans l'étude bibliographique, nous avons présenté l'influence des fibres polypropylènes sur la stabilité thermique des matériaux face aux hautes températures. Au regard de ce point, c'est intéressant d'étudier l'effet des fibres végétales. C'est l'objet de la dernière partie du chapitre.

2. EVALUATION DE LA RESISTANCE A L'IMPACT DES MORTIERS

L'introduction de fibres dans les mortiers peut entraîner une augmentation de l'énergie de rupture en traction dont l'ampleur dépend de différents facteurs (Araya-Letelier et al., 2017; Daniel et al., 2002) :

- le type de fibres,
- ses propriétés physiques (teneur, longueur, diamètre),
- ses propriétés mécaniques (résistance à la traction et module d'élasticité),
- la distribution et l'orientation des fibres.

L'objectif de cette partie est d'étudier la capacité des fibres végétales à améliorer le comportement d'un mortier vis-à-vis d'une force de choc et comparativement à l'efficacité de fibres polypropylènes.

2.1. Résumé bibliographique

Lorsque le matériau est soumis à une charge ou subit un choc, il s'installe un champ de contraintes et de déplacements dans la masse. Cependant, selon la nature des charges et du matériau, différents comportements pourront être observés. La **Figure V-1** présente 3 formes de ces comportements (Asmaro, 2013).

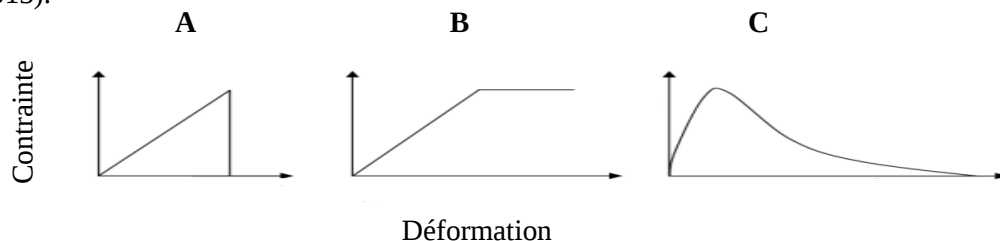


Figure V-1: Comportement du matériau sous l'action d'une force extérieure (Asmaro, 2013)

On peut observer 3 comportements différents.

Cas A : Comportement fragile, la résistance tombe à zéro avec la fissuration.

Cas B : La résistance reste proche de la contrainte seuil du matériau lors de la propagation de la fissure et forme un plateau plastique. Ce dernier n'est pas réaliste, mais le métal à un comportement qui s'en rapproche.

Cas C : C'est le cas qui nous intéresse dans notre étude (comportement adoucissant induit par un renfort par des fibres d'une matrice fragile à l'origine). Le comportement observé correspond à une baisse progressive de la résistance résiduelle post fissuration. Les étapes suivantes sont généralement observées sur ce type de comportement :

- initiation négligeable des fissures internes,
- propagation de fissures isolées aléatoirement distribuées appelées microfissures,
- localisation en fissures majeures appelées macrofissures qui se propagent avec l'augmentation de la force appliquée,
- post-pic ; une macrofissure continue de se propager et la résistance résiduelle décroît.

La matrice minérale (béton, mortier) est caractérisée par un comportement fragile dont la réponse peut être modifiée significativement par un renfort de fibres. Comme expliqué précédemment, ces dernières par leur capacité à transférer des contraintes à travers l'ouverture de la fissure permettent de contrôler sa propagation. Ceci confère au matériau composite une résistance post-fissuration en supportant des déformations plus importantes avec une résistance résiduelle post fissuration plus ou moins significative, fonction du type de fibres et de leur dosage. Les fibres permettent donc d'éviter la propagation brutale de la fissuration (effets de pontage) par une multiplication des microfissures avant sa coalescence en macrofissures ce qui correspond au cas **C** dans la **Figure V-1**. Cette résistance post-fissuration contribue à augmenter la ténacité du composite. L'essai de la résistance à l'impact permet d'évaluer la capacité du matériau à résister à la propagation d'une fissure suite à une force de choc. La ténacité du matériau peut être évaluée par cet essai.

Il existe dans la littérature plusieurs montages expérimentaux qui permettent d'évaluer la ténacité du matériau. Le **Tableau V-1** présente quelques méthodes réalisées dans le but de déterminer la résistance à l'impact d'un matériau fibré.

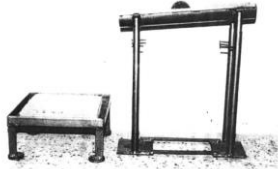
Référence	Fibres	Moule (mm ³)	Paramètres de l'essai	Illustration
(Araya-Letelier et al., 2017)	Poils de cochon	400 x 400 x 40	$H_{chute} = 160 \text{ mm}$ $M_{bille} = 0,44 \text{ kg}$ $Ep/choc = 0,7 \text{ J}$	
(Ramakrishna and Thirumalai, 2005b)	Coco, sisal et jute	300 x 300 x 20	$H_{chute} = 200 \text{ mm}$ $M_{bille} = 0,475 \text{ kg}$ $Ep/choc = 0,9 \text{ J}$	
(Muda et al., 2016)	Kénaf	300 x 300 x (30,40 et 50)	$H_{chute} = 400 \text{ mm}$ $M_{bille} = 1,236 \text{ kg}$ $Ep/choc = 5 \text{ J}$	

Tableau V-1: Quelques dispositifs expérimentaux pour évaluer la résistance à l'impact

Dans la partie suivante, on décrit le montage développé pour évaluer la résistance à l'impact du mortier et la méthode de mesure adoptée.

2.2. Dispositif expérimental

2.2.1. Description du montage

Afin d'évaluer la résistance à l'impact du mortier et étudier l'effet des fibres sur la ténacité, on a développé un dispositif d'essai à la bille. Le principe de cet essai est de lâcher une bille métallique sur une plaque de mortier pour déterminer l'énergie nécessaire pour l'initiation de la première fissure et l'énergie nécessaire pour avoir la rupture du matériau. La **Figure V-2** illustre le banc expérimental développé.

Le dispositif a été fabriqué spécialement pour cet essai en utilisant un support en bois sur lequel la plaque de mortier sera posée. Deux colonnes métalliques sont liées par une traverse sur laquelle la bille est suspendue et fixée avec une goupille. Le montage d'essai a été préparé de manière à ce que la bille métallique tombe au centre de la plaque testée.

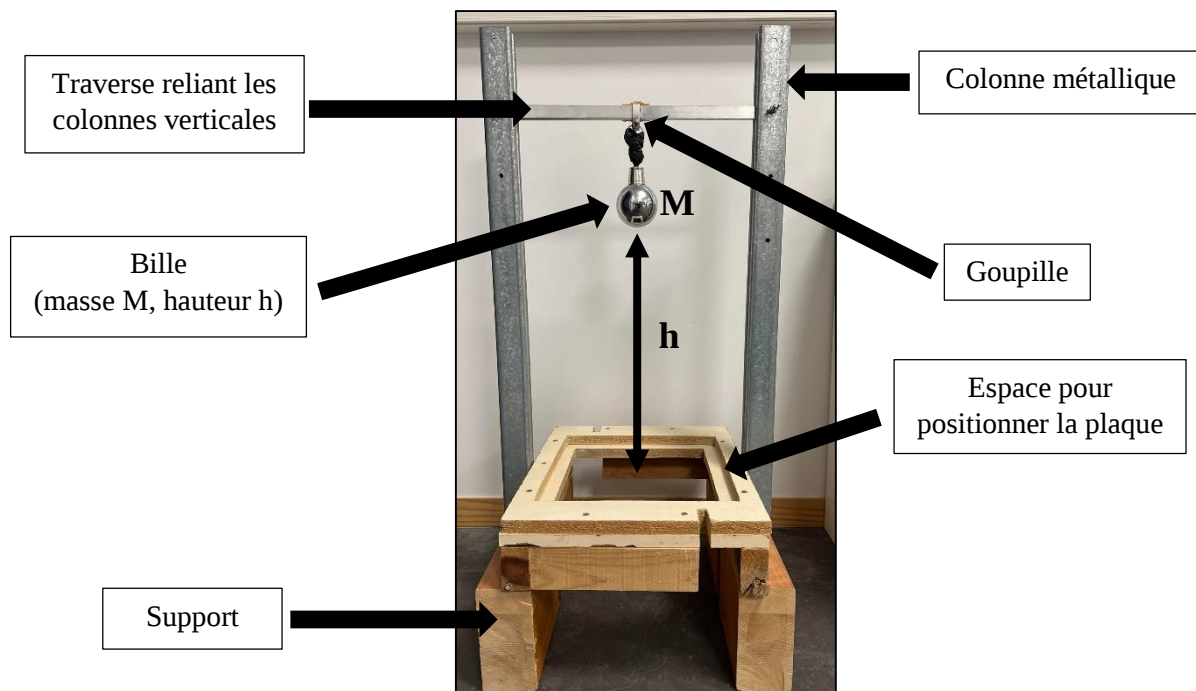


Figure V-2: Banc expérimental pour l'essai à l'impact

2.2.2. Paramètres de l'essai

Le **Tableau V-2** présente les différentes caractéristiques de l'essai. La hauteur de chute de la bille sur la plaque de mortier a été choisie après plusieurs essais avec des valeurs différentes. (Ramakrishna and Thirumalai, 2005b) ont évalué la résistance à l'impact sur des plaques des mortiers dont les dimensions sont similaires que celles utilisées dans notre étude (300 x 300 x 20 mm³). Les auteurs ont adopté une hauteur de chute de 200 mm. Dans notre étude, cette hauteur semble être faible car elle correspond à une apparition de la fissure entre 9 et 12 chocs et une durée totale de l'essai qui peut arriver à 100 chocs dans le cas des formulations fibrées. On a décidé donc de doubler la hauteur (400 mm). Après plusieurs tests, cette hauteur a permis d'avoir une initiation de la fissure avec un nombre des chocs qui varie entre 3 et 5 et une durée totale de l'essai inférieur à 50 chocs pour l'ensemble des matériaux. Pour le mortier pouzzolanique, le choix de la hauteur a été choisi en se basant sur sa résistance à la

flexion à 28 jours (4,5 MPa) qui correspond à la moitié de celle du mortier cimentaire (9 MPa). On a décidé d'adopter une hauteur de 200 mm. Cette valeur correspond à une énergie par choc de 1 Joule.

Masse de la bille	0,55 kg
Hauteur de chute	400 mm (cimentaire) et 200 mm (pouzzolanique)
Dimensions de la plaque	300 x 300 x 20 mm ³ (espace vide 260 x 260 mm ²)
Nombre de plaques testées par formulation	6 plaques
Echéance du test	28 et 180 jours

Tableau V-2: Les différents paramètres de l'essai à l'impact

Le protocole de malaxage pour la plaque destinée à l'essai de l'impact est le même que celui de l'ensemble des essais. Après malaxage, le mélange est coulé dans un moule fabriqué spécialement pour cet essai puis compacté sur une table vibrante pendant 15 secondes. Les plaques sont couvertes d'un film plastique et conservées dans les conditions ambiantes du laboratoire pendant 24 heures. Ensuite, les plaques sont démoulées et stockées dans des sacs étanches en attendant l'échéance du test.

La détermination de la résistance à l'impact via cet essai est très sensible car elle dépend de l'utilisateur qui doit apprécier l'instant de l'initiation de la première fissure (parfois difficile à détecter) et de la rupture complète ce qui induit parfois des résultats variables. La question qu'on se pose ici est la suivante :

Comment détecter de manière fiable l'initiation de la première fissuration et la rupture du matériau ?

Visuellement, la détection de l'instant de l'initiation de la fissure n'est pas aisée et donc pas assez précise et peut être soumise à une grande variabilité en fonction de l'opérateur. Pour pallier cette difficulté, la méthode alternative proposée ici est le suivi du temps de propagation d'ondes ultrasonores dans la plaque testée. Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques des atomes qui forment la matière. Leur transmission s'effectue donc de proche en proche via les liaisons atomiques (**Figure V-3**). Ainsi, un matériau compact et rigide présentera une grande vitesse de propagation. Sous l'action d'un choc, les liaisons atomiques sont rompues au cours du temps ce qui provoque une diminution de la rigidité et donc de la vitesse de transmission des ondes. La vitesse de la transmission C des ondes dépend du module d'élasticité du matériau E , de son coefficient de Poisson ν et de sa masse volumique ρ .

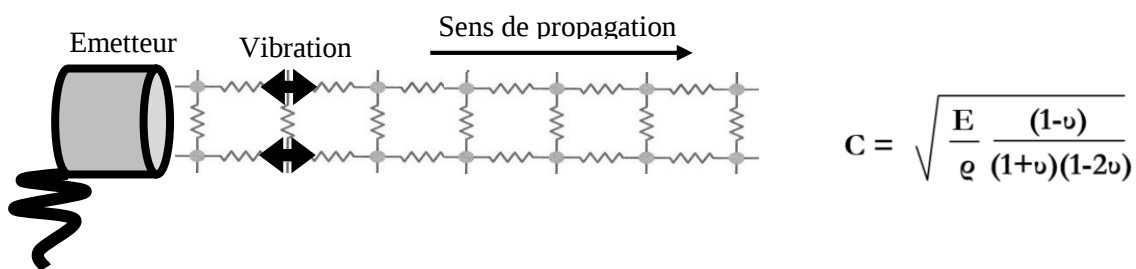


Figure V-3: Principe physique de la transmission des ondes ultrasonores et relation à la rigidité du matériau

Cette approche est plus fiable car elle permet d'éviter les artefacts liés au jugement de l'opérateur. Avec le dispositif ultrasonore, on va pouvoir détecter la première fissuration de l'éprouvette par une diminution brutale de la vitesse des ondes. Pour la rupture, elle va se traduire par une vitesse trop faible que l'appareil ne détectera plus. Le temps de transmission des ondes maximal détecté par l'appareil est de 2000 μ s, la fréquence des transmetteurs est de 54 kHz et la pulsation de test est de 1 Hz (**Figure V-4**).

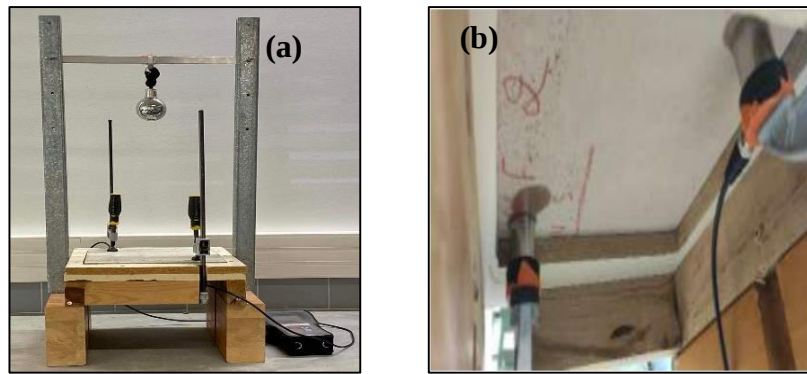


Figure V-4: Principe de mesure de la vitesse de la propagation des ondes ultrasonores
(a) vue de face et (b) vue de dessous

A travers cet essai, on va pouvoir calculer l'énergie d'impact cumulée nécessaire pour amorcer une première fissuration et celle pour la rupture selon l'**Équation V-1** :

$$E = N \cdot m \cdot g \cdot h \quad \text{Équation V-1}$$

Avec :

- E énergie potentielle cumulée (J)
- N nombre de coups
- M masse de la bille (kg)
- g accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$)
- h hauteur de chute (m)

La **Figure V-5** montre un exemple de la variation de vitesse des ondes ultrasonores en fonction de l'énergie d'impact cumulée entre un mortier non fibré et fibré.

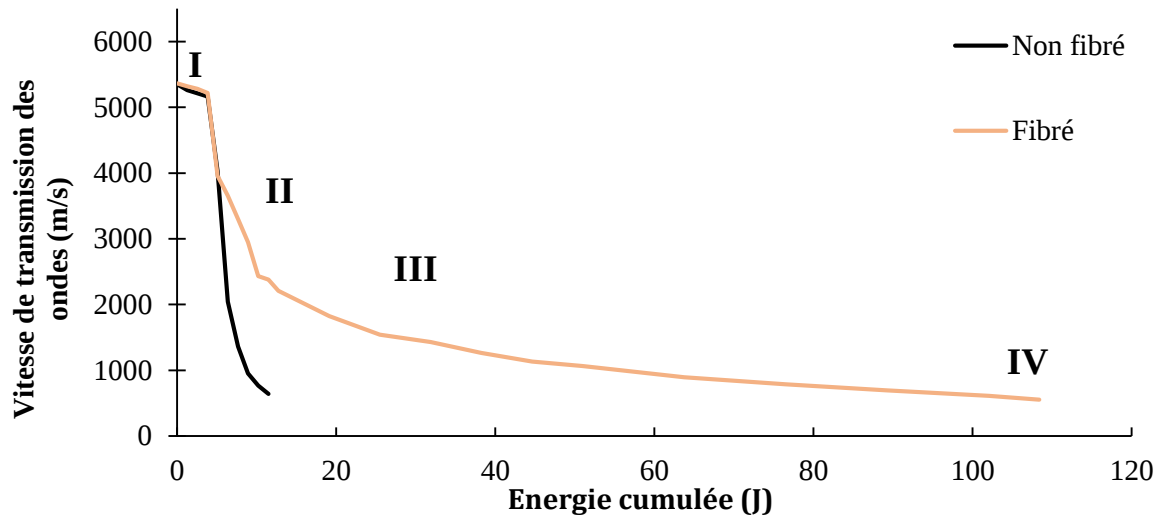


Figure V-5: Exemple de variation de la vitesse de transmission des ondes ultrasonores en fonction de l'énergie cumulée d'impact pour un mortier non fibré et fibré

Les résultats obtenus permettent de mettre en lumière plusieurs phases dans le comportement pendant l'essai.

Zone I : Comportement avant l'initiation de la fissuration

Cette zone montre une réponse quasi-linéaire similaire entre les 2 formulations ce qui montre que la transmission de l'onde est majoritairement assurée par la matrice.

Zone II : Initiation de la fissuration

La chute de la vitesse des ondes observée dans cette zone correspond à une augmentation de la durée de transmission des ondes entre l'émetteur et le récepteur ce qui traduit l'apparition de la première macrofissure dans le matériau (**Figure V-6**)

Zone III : Comportement post-fissuration

C'est dans cette zone qu'on peut mettre en évidence le rôle des fibres. En effet, un contrôle de la rupture a été observé pour la formulation fibrée ce qui correspond à une reprise de la charge par les fibres qui permettent de limiter la propagation de la fissure par l'effet de pontage. Au contraire, la formulation non fibrée présente une rupture brutale après l'initiation de la première fissure.

Zone IV : Rupture du matériau

Le moment de la rupture correspond au dernier point affiché par l'appareil de mesure. Cette phase peut être liée à la destruction des interfaces entre les fibres et la matrice (**Figure V-7**).

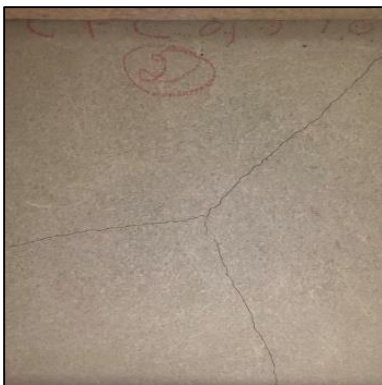


Figure V-6: La première fissure

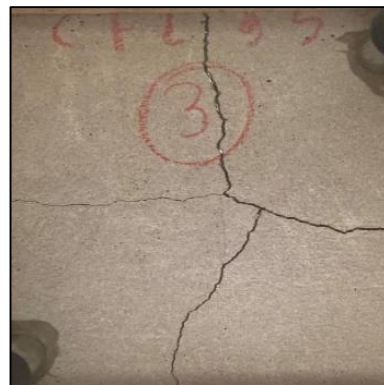


Figure V-7: La rupture du matériau

2.3. Résultats et discussions

2.3.1. Evaluation de la résistance à l'impact à 28 jours

La **Figure V-8** et la **Figure V-9** montrent la variation de vitesse de transmission des ondes ultrasonores en fonction de l'énergie d'impact cumulée pour les formulations cimentaires et pouzzolaniques testées.

Pour les différents mortiers testés, la vitesse de transmission des ondes en fonction de l'énergie cumulée est identique et linéaire avant l'initiation de la première fissure. Cette observation montre que toutes les formulations ont une rigidité équivalente et aucun effet des fibres n'a été mis en évidence. Une fois la fissuration initiée, les deux formulations non fibrées (CNF et PNF) présentent une rupture brutale et aucun contrôle n'a été observé. Pour les mélanges fibrés, on peut mentionner une rupture contrôlée avec une augmentation de l'énergie cumulée à la rupture. Cette modération varie avec le type de fibre et le dosage.

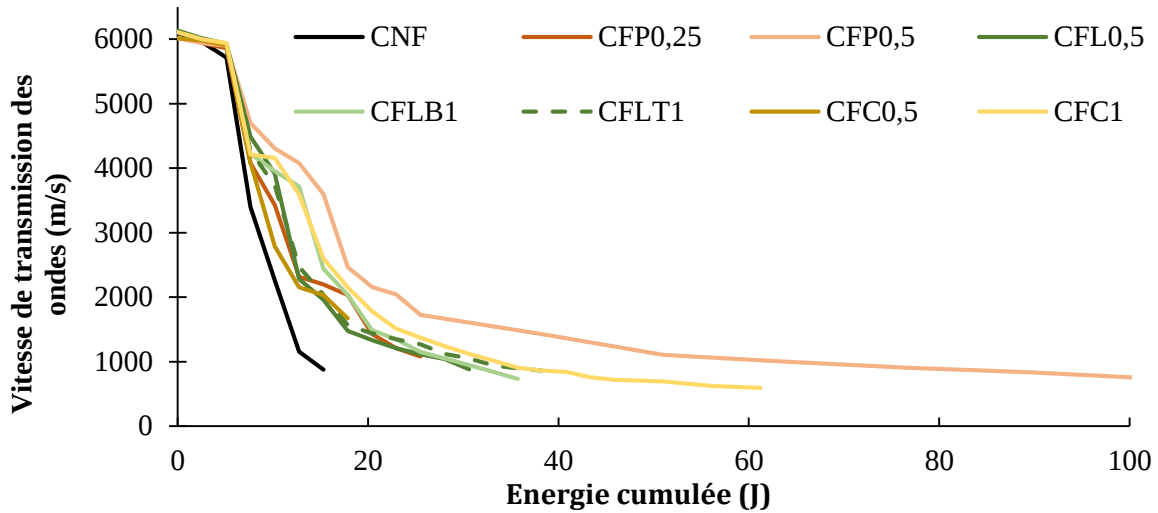


Figure V-8: La variation de la vitesse de transmission des ondes ultrasonores en fonction de l'énergie cumulée d'impact pour les formulations cimentaires.

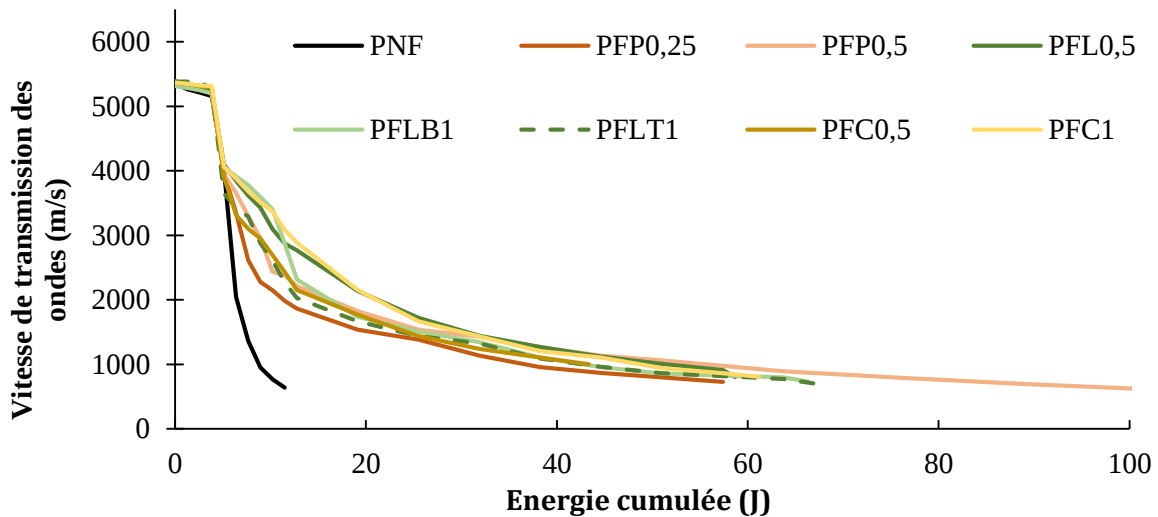


Figure V-9: La variation de la vitesse de transmission des ondes ultrasonores en fonction de l'énergie cumulée d'impact pour les formulations pouzzolaniques

Les **Figure V-10** et **Figure V-11** présentent l'énergie d'impact cumulée pour l'initiation de la fissuration et pour la rupture de la plaque de mortier.

Comme on l'a précédemment présenté, l'énergie cumulée pour l'apparition de la première fissure est similaire entre toutes les formulations. Pour les mortiers cimentaires, cette énergie varie entre 8 et 10 Joules et entre 4 et 5 Joules pour les mortiers pouzzolaniques.

Pour l'énergie cumulée à la rupture, on peut observer une augmentation significative pour toutes les formulations fibrées et pour les deux types de mortier. Cependant, cette augmentation est plus importante dans le cas des mortiers renforcés par les fibres polypropylènes. Pour CFP0,5 et PFP0,5, l'énergie de la rupture est de 123 Joules et 107 Joules ce qui correspond à une amélioration de 850% et de 1000% par rapport au CNF et PNF respectivement. Pour le mortier renforcé par des fibres de lin, l'énergie est de 25 Joules pour CFL0,50 (+100%) et 56 Joules pour PFL0,50 (+500%). Cette augmentation croît avec la teneur en fibres : CFLB1 (+200%) et PFLB1 (+600%). Pour les mortiers renforcés avec des fibres de chanvre, l'amélioration est moins importante que celle obtenue avec des fibres de lin avec une énergie de 17 Joules (+40%) et 47 Joules (+400%) pour CFC0,5 et PFC0,5

respectivement. Comme pour les fibres de lin, l'énergie à la rupture a évolué avec l'augmentation de la teneur en fibres de chanvre. Pour CFC1, l'énergie observée est de 40 Joules (+200%) et 60 Joules (+500%) pour PFC1. Pour les formulations renforcées avec les fibres de lin traitées, des résultats similaires à ceux renforcées par les fibres de lin brut ont été observés. Pour CFLT1 l'énergie détectée est de 39 Joules (+200%) et 70 Joules (+700%) pour PFLT1. Pour CFP0,25, une énergie de 28 Joules (+120%) a été observée et une énergie de 56 Joules (+500%) pour PFP0,25. Ces résultats sont équivalents à ceux obtenus avec 0,5% de fibres de lin et 1% de fibres de chanvre.

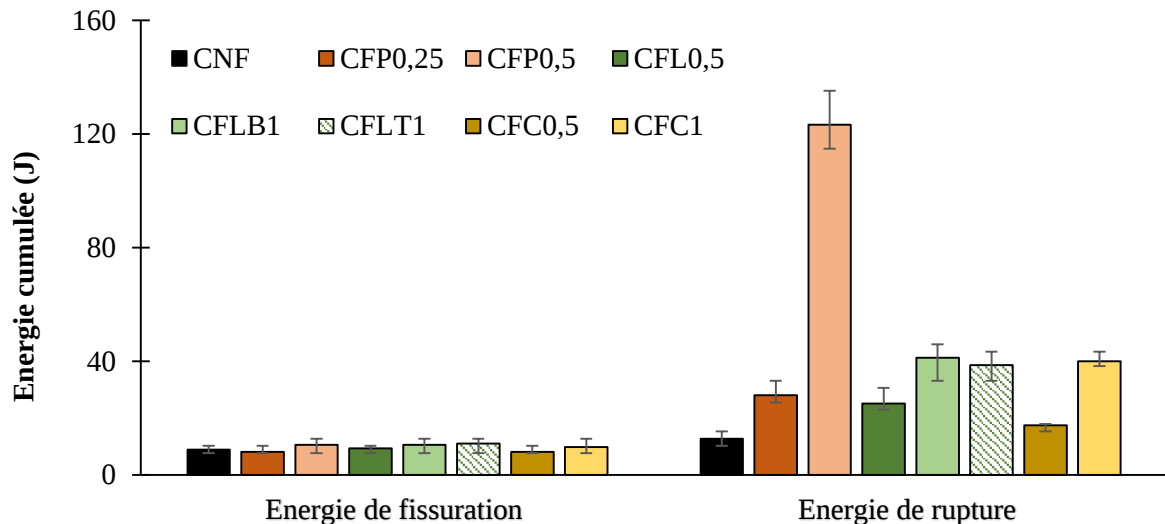


Figure V-10: Energie cumulée d'impact pour les formulations cimentaires

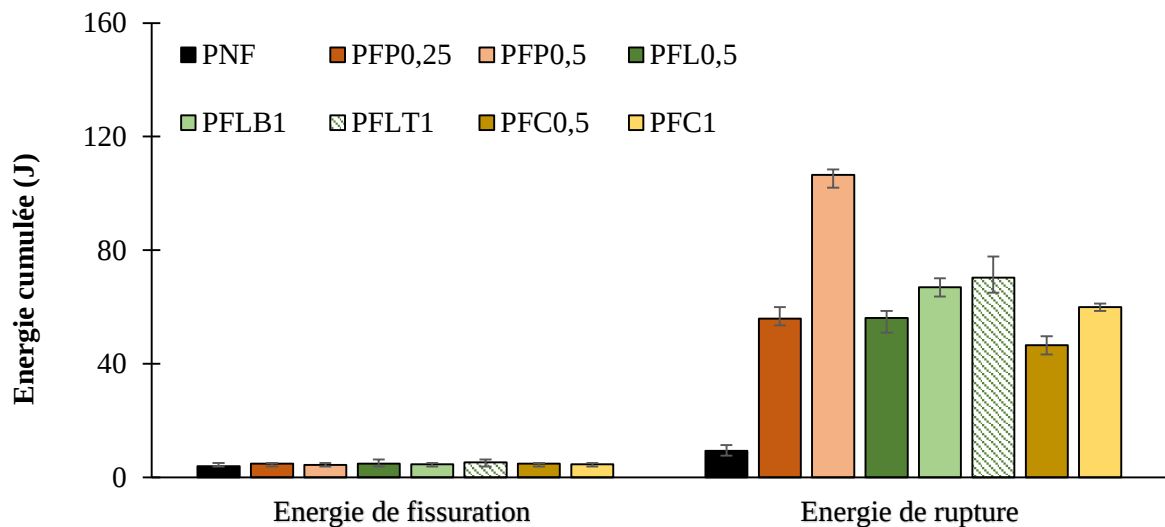


Figure V-11: Energie cumulée d'impact pour les formulations pouzzolaniques

Tout d'abord, on peut relever un accroissement de l'énergie de rupture pour toutes les formulations qui peut s'expliquer par la formation de nombreuses microfissures et leur pontage par les fibres, quel que soit leur type et leur dosage, avant leur coalescence en macrofissures. Un renfort par des fibres est donc clairement bénéfique sur le comportement à l'impact des mortiers.

Par rapport aux fibres végétales, les fibres polypropylènes ont montré une meilleure efficacité pour améliorer le comportement à l'impact des plaques testées. Cette performance peut être attribuée au grand nombre de fibres unitaires présentes associé à une très bonne dispersion des fibres dans le composite (**Figure V-12**). Cette propriété pour laquelle ces fibres sont largement utilisées, confère au matériau un renfort homogène. Les fibres végétales sont moins nombreuses et présentent des discontinuités de

répartition causées par des longueurs hétérogènes et un état de surface rugueux favorisant des agglomérations. C'est une observation faite régulièrement et qui est un point faible des fibres végétales.

Les résultats obtenus montrent que pour un dosage identique, le renfort par des fibres de chanvre paraît légèrement moins efficace qu'avec des fibres de lin qui sont dispersées d'une manière plus homogène (**Figure V-13**). Cette différence peut provenir uniquement de la variabilité de longueur entre les fibres due à la méthode de découpe manuelle réalisée sur ce type de fibre. La longueur de la fibre de chanvre qui varie entre 5 et 30 mm a une fâcheuse tendance à favoriser la formation d'oursin (**Figure V-14**). Ceci signifie que les fibres longues ont tendance à s'entremêler en rendant plus difficile leur dispersion dans la matrice (Kriker et al., 2005; Magniont, 2010a) et elles restent regroupées en amas. Cette mauvaise dispersion laisse des zones sans renfort plus importantes et la fissure se propage plus facilement.



Figure V-12: Dispersion des fibres de polypropylènes



Figure V-13: Dispersion des fibres de lin



Figure V-14: Amas des fibres de chanvre

Une teneur en fibres plus importante signifie un plus grand nombre de fibres dans la matrice et on peut supposer une performance accrue par un renfort plus dense qui permet de freiner la propagation des fissures. Ceci est vérifié pour les fibres de polypropylène mais beaucoup moins évident pour les végétales. On en revient à la qualité de la dispersion qui reste bonne pour les fibres polypropylènes malgré un dosage double. En revanche, l'augmentation du nombre de fibres végétales augmente aussi le risque d'agglomérations et les bénéfices attendus ne sont pas aussi présents.

La liaison fibre/matrice est un paramètre important car c'est sur cette zone que l'on peut évaluer la capacité des fibres à transférer les contraintes à travers une fissure. D'après les résultats obtenus à

l'impact, la qualité d'adhérence a permis un transfert efficace des charges au stade de la microfissuration comme à celui de la macrofissuration pour l'ensemble des fibres testées.

La propagation d'une fissure lors de petits chocs répétés répond à la logique simple du chemin de moindre résistance. Si on souhaite concurrencer de manière efficace les fibres polypropylènes vis-à-vis de la résistance à l'impact, les paramètres suivants paraissent incontournables :

- un dosage double en fibres végétales pour assurer un nombre suffisant de fibres,
- une longueur (10-15 mm) permettant un ancrage suffisant ainsi qu'une dispersion homogène sans favoriser la formation d'oursins,
- une bonne adhérence fibre/matrice assurant le transfert des charges.

2.3.2. Comparaison de la résistance à l'impact entre 28 et 180 jours

Afin d'évaluer la durabilité des fibres dans les mortiers et l'effet d'un prétraitement, on a repris l'essai à l'impact sur certaines formulations à 180 jours (PFP0,5, PFLB1 et PFLT1)

La **Figure V-15** et la **Figure V-16** présentent une comparaison de la résistance à l'impact (énergie cumulée à la rupture) à 28 et 180 jours pour les mortiers cimentaire et pouzzolanique respectivement.

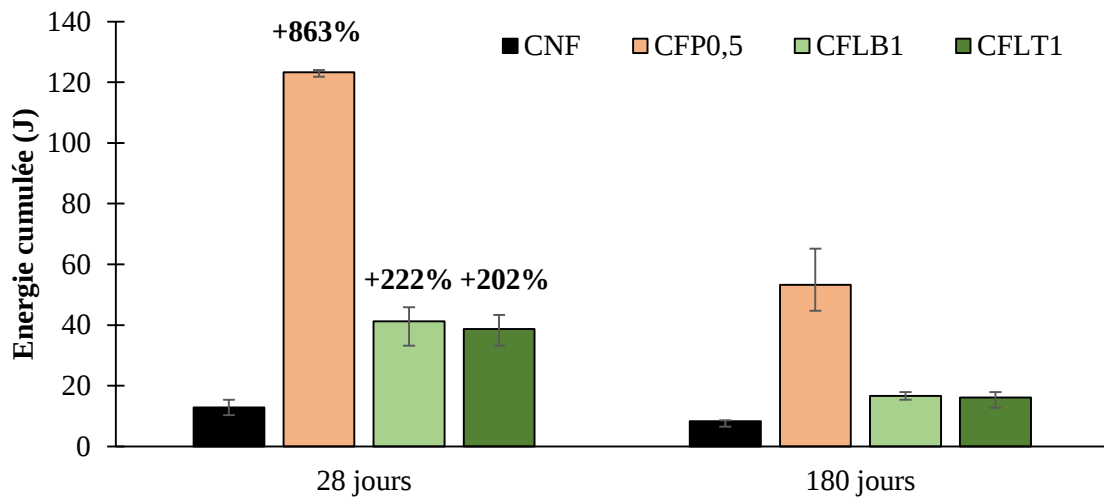


Figure V-15: Energie cumulée à la rupture, essai à l'impact pour les formulations cimentaires à 28 et 180 jours

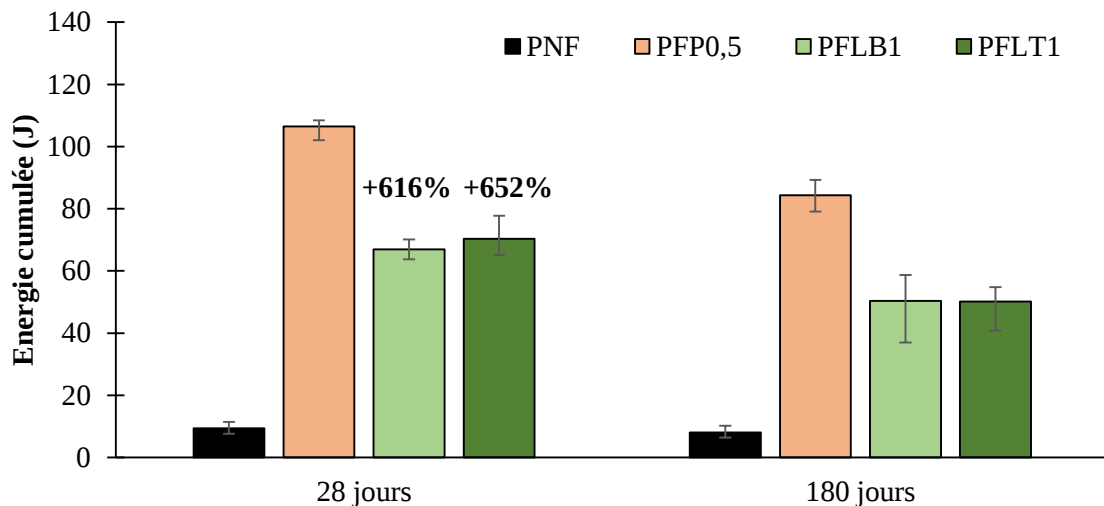


Figure V-16: Energie cumulée à la rupture, essai à l'impact pour les formulations pouzzolaniques à 28 et 180 jours

Les résultats obtenus montrent qu'à 180 jours, toutes les formulations fibrées présentent toujours une énergie à la rupture plus élevée que le mortier de référence (CNF et PNF). Cependant, dans tous les cas, ce gain de performance est inférieur à celui à 28 jours.

Pour les mortiers cimentaires, on peut mentionner une baisse de l'énergie à la rupture pour toutes les formulations, y compris le mortier de référence non fibré, entre 28 et 180 jours. Cette baisse globale peut être liée soit à une perte de résistance de la matrice cimentaire (peu probable selon les essais mécaniques qui suivent), soit à une qualité inférieure des formulations fabriquées pour cette deuxième échéance. Si on compare avec la référence testée à la même échéance, la perte de gain pour les fibres polypropylène provient donc d'une liaison fibre/matrice plus faible à 180 jours. On peut considérer en effet que ces fibres ne s'altèrent pas dans la matrice. Pour les fibres végétales, la perte de performance est accentuée (divisée par 2). On a déjà abordé la sensibilité des fibres végétales au milieu alcalin qui induit une fragilisation de fibres et des interfaces fibres/matrices. Des essais complémentaires sont à prévoir pour préciser les rôles différenciés de la matrice et des fibres sur cette évolution au cours du temps.

Pour les mortiers pouzzolaniques, on retrouve une baisse de performance mais nettement moins marquée. Les formulations renforcées par les fibres de polypropylène ont une énergie à la rupture qui correspond à un gain de 950% (1040% à 28 jours) par rapport à l'énergie de rupture du mortier de référence. Dans le cas des composites renforcés par les fibres de lin brut et traité, on note un gain d'environ 520% au lieu de 620% à 650% à 28 jours. On peut attribuer cette baisse à une fragilisation des interfaces fibre/matrice au cours du temps quel que soit le type de fibre. Globalement, l'apport d'un renfort fibré dans une matrice pouzzolanique reste très efficace vis-à-vis de l'impact à 28 comme à 180 jours. Les mortiers à base de ce type de liant permettent de diminuer l'agressivité alcaline envers les fibres grâce à la réaction pouzzolanique ce qui améliore la durabilité de fibres végétales.

Concernant l'effet du prétraitement testé (10 cycles d'humidification/séchage) sur les fibres de lin, l'énergie nécessaire à la rupture de l'échantillon est similaire dans l'ensemble des cas. Les résultats de cette étude ne permettent pas de conclure sur un effet positif ou négatif du prétraitement sur le comportement à l'impact à 28 et 180 jours.

3. COMPORTEMENT MECANIQUE DES MORTIERS

3.1. Résistance en compression

Les essais de compression ont été menés sur 6 demi-épreuves obtenues après l'essai de flexion 3 points pour l'ensemble des formulations cimentaires et pouzzolaniques sur plusieurs échéances : 1, 7, 28 et 180 jours. La **Figure V-17** et la **Figure V-18** récapitulent les résultats obtenus pour les 4 échéances.

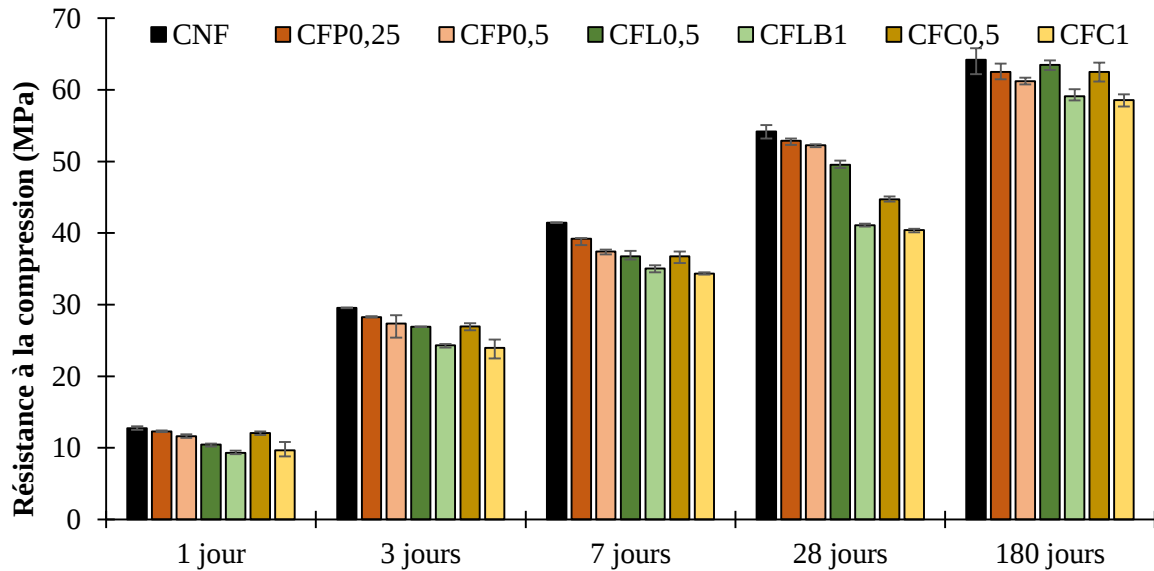


Figure V-17: Evolution de la résistance à la compression des mortiers cimentaires en fonction du temps

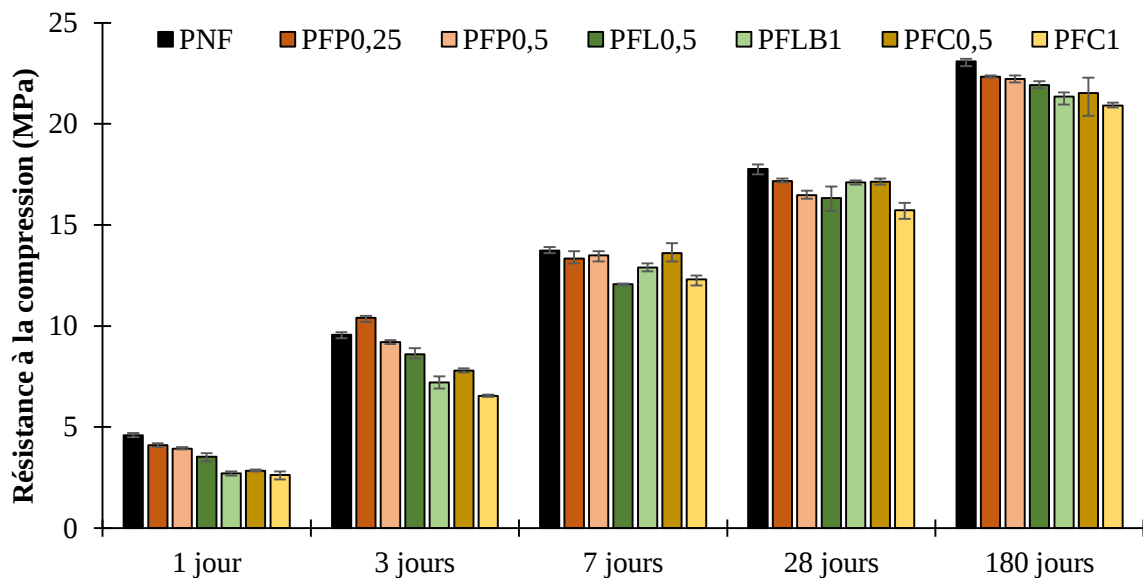


Figure V-18: Evolution de la résistance à la compression des mortiers pouzzolaniques en fonction du temps

Tout d'abord, on peut observer que la résistance à la compression de toutes les formulations augmente régulièrement en fonction du temps. La résistance du mortier cimentaire témoin évolue de 13 MPa (1 jour) à 64 MPa (180 jours) et de 5 MPa à 23 MPa pour le mortier pouzzolanique témoin. Le **Tableau V-3** et le **Tableau V-4** représentent la réduction de la résistance à la compression en pourcentage par rapport aux mortiers de référence cimentaire et pouzzolanique respectivement.

	Perte de la résistance en % par rapport au mortier de référence			
	1 jour	7 jours	28 jours	180 jours
CFP0,25	4	4	2	3
CFP0,5	10	7	4	5
CFL0,5	22	9	9	1
CFLB1	37	18	24	8
CFC0,5	6	9	17	3
CFC1	32	19	25	9

Tableau V-3: La réduction de la résistance à la compression du mortier cimentaire par rapport au mortier de référence (%)

	Perte de la résistance en % par rapport au mortier de référence			
	1 jour	7 jours	28 jours	180 jours
PFP0,25	11	3	3	3
PFP0,5	15	2	7	4
PFL0,5	23	12	8	5
PFLB1	41	6	4	8
PFC0,5	38	1	4	7
PFC1	43	10	11	11

Tableau V-4: La réduction de la résistance à la compression du mortier pouzzolanique par rapport au mortier témoin (%)

On peut constater que l'incorporation de fibres dans un mortier ordinaire se fait au détriment de la résistance à la compression et ce quelle que soit l'échéance de l'essai. Cette réduction est plus importante dans les cas des mortiers renforcés par les fibres végétales. A l'échéance d'un jour, la réduction de la résistance des mortiers renforcés par des fibres polypropylènes varient entre 4 et 10% pour le mortier cimentaire et entre 11 et 15% pour le pouzzolanique. Pour les formulations avec des fibres végétales, la réduction est importante (entre 6 et 37 % pour les mortiers cimentaires et entre 23 et 43% pour les mortiers pouzzolaniques). Ce ralentissement au niveau du développement de la résistance à la compression peut être lié au retard de prise observé dans le **chapitre III**. En effet, l'ajout des fibres végétales peut retarder la prise suite à l'effet des hydrosolubles. Pour les autres échéances, on peut noter une diminution de la résistance en compression par rapport au mortier témoin pour toutes les formulations renforcées par des fibres végétales. Cette perte est liée à la structure poreuse des fibres végétales qui favorise la création de pores dans le composite ce qui signifie une diminution de la compacité du composite dans sa globalité et donc la diminution de la résistance à la compression. Après 180 jours de cure, on peut observer que la résistance à la compression s'approche que celle du mortier témoin pour les deux liants. On peut envisager que l'ajout de fibres végétales n'a pas un effet néfaste sur le comportement en compression des composites sur le long terme.

La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du dosage en fibres végétales. Ceci pourra être expliqué par l'augmentation plus importante de la porosité par un effet d'entraînement d'air (Page, 2017a). Au moment du chargement de compression, et dans le cas où les fibres adhèrent suffisamment à la matrice, elles subissent un micro flambage. Ceci génère des micro fissurations qui convergent progressivement autour des fibres et accélèrent la rupture du composite (Baley, 2004b; Chafei, 2014). Mais il convient que la diminution de la compacité évoquée précédemment a un impact plus important lorsque le dosage en fibre augmente.

Effet du prétraitement des fibres sur le comportement en compression du composite

La **Figure V-19** et la **Figure V-20** montrent une comparaison de la résistance à la compression des mortiers renforcés par des fibres de lin brut ou traité et le mortier témoin à 28 et 180 jours.

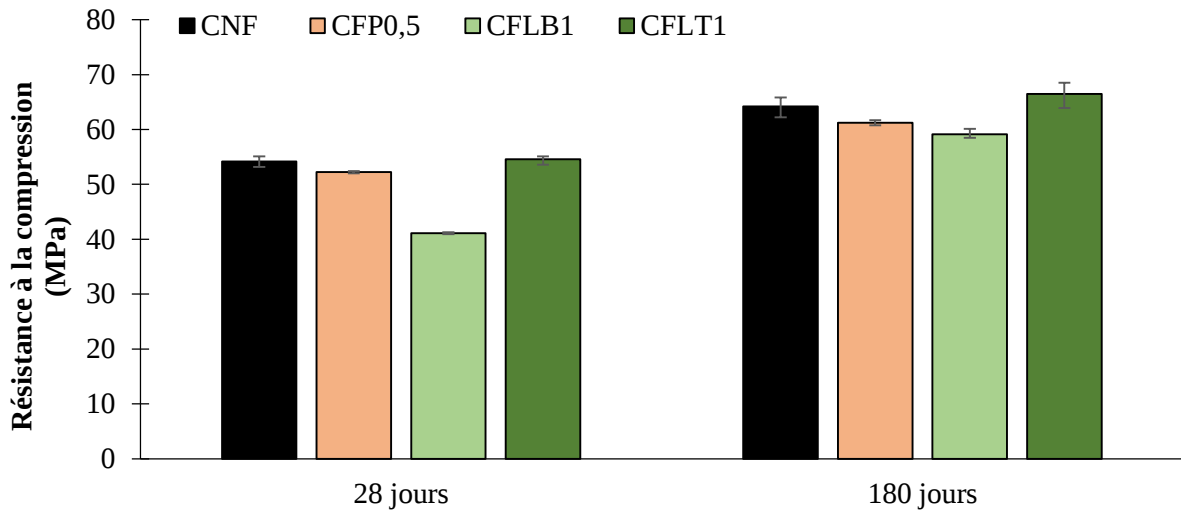


Figure V-19 : Résistance à la compression pour les formulations cimentaires à 28 et 180 jours

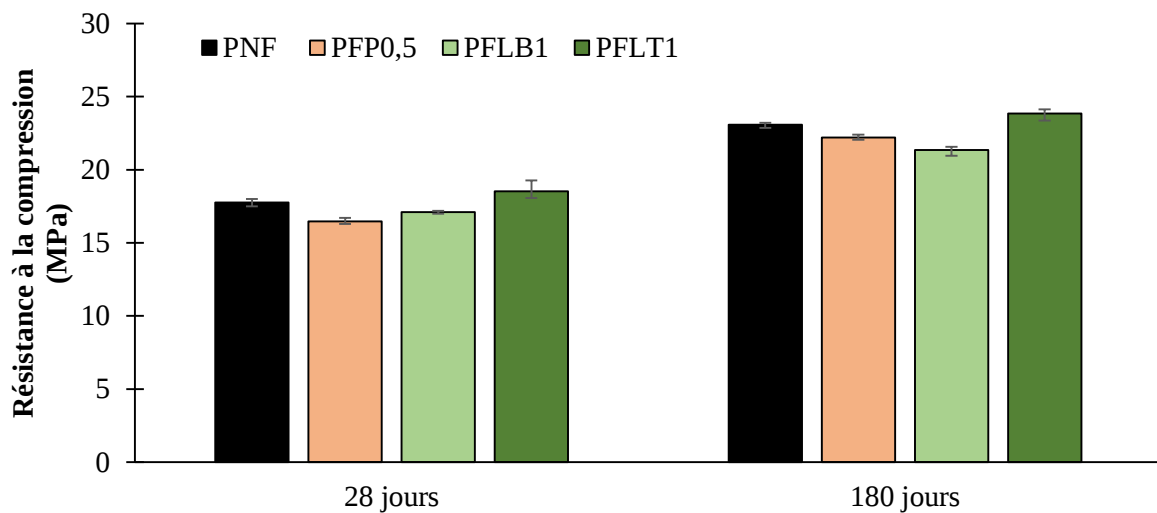


Figure V-20: Résistance à la compression pour les formulations pouzzolaniques à 28 et 180 jours

Les résultats obtenus montrent une augmentation de la résistance à la compression du CFLT1 et PFLT1 par rapport à CFLB1 et PFB1 respectivement. La résistance à la compression est devenue plus proche de celle du mortier témoin. En effet, on a noté dans le **chapitre II** une diminution de 25% du coefficient d'absorption d'eau des fibres de lin suite au prétraitement. Cette diminution peut expliquer cette amélioration de la résistance à la compression. On a vu précédemment que les fibres de lin subissent des cycles d'absorption/désorption à cause de leur caractère hydrophile qui induisent la formation de cavités entre la fibre et la matrice et donc une augmentation de la porosité du matériau. Une diminution de la quantité d'eau absorbée par les fibres permet de diminuer les effets de gonflement/rétrécissement au cours du temps en réduisant les pores au niveau de l'interface fibre/matrice. Pour confirmer cette hypothèse, la mesure de la porosité du matériau est indispensable.

3.2. Comportement à la flexion

Le but principal d'un renfort par des fibres dans le matériau cimentaire est de réduire sa fragilité. Ce renfort a pour objectif de conférer au composite une résistance résiduelle post fissuration significative, notamment en traction directe ou en traction par flexion. L'efficacité de ce renfort dépend de plusieurs

paramètres, notamment : le type et le dosage en fibres, leur orientation et la qualité du transfert de contrainte à l'interface fibre-matrice qui dépend aussi bien de la fibre que de la qualité de la matrice.

La **Figure V-21** montre l'évolution de la force en flexion 3 points en fonction de la flèche pour toutes les formulations cimentaires et pouzzolaniques à plusieurs échéances : 1, 7, 28 et 180 jours.

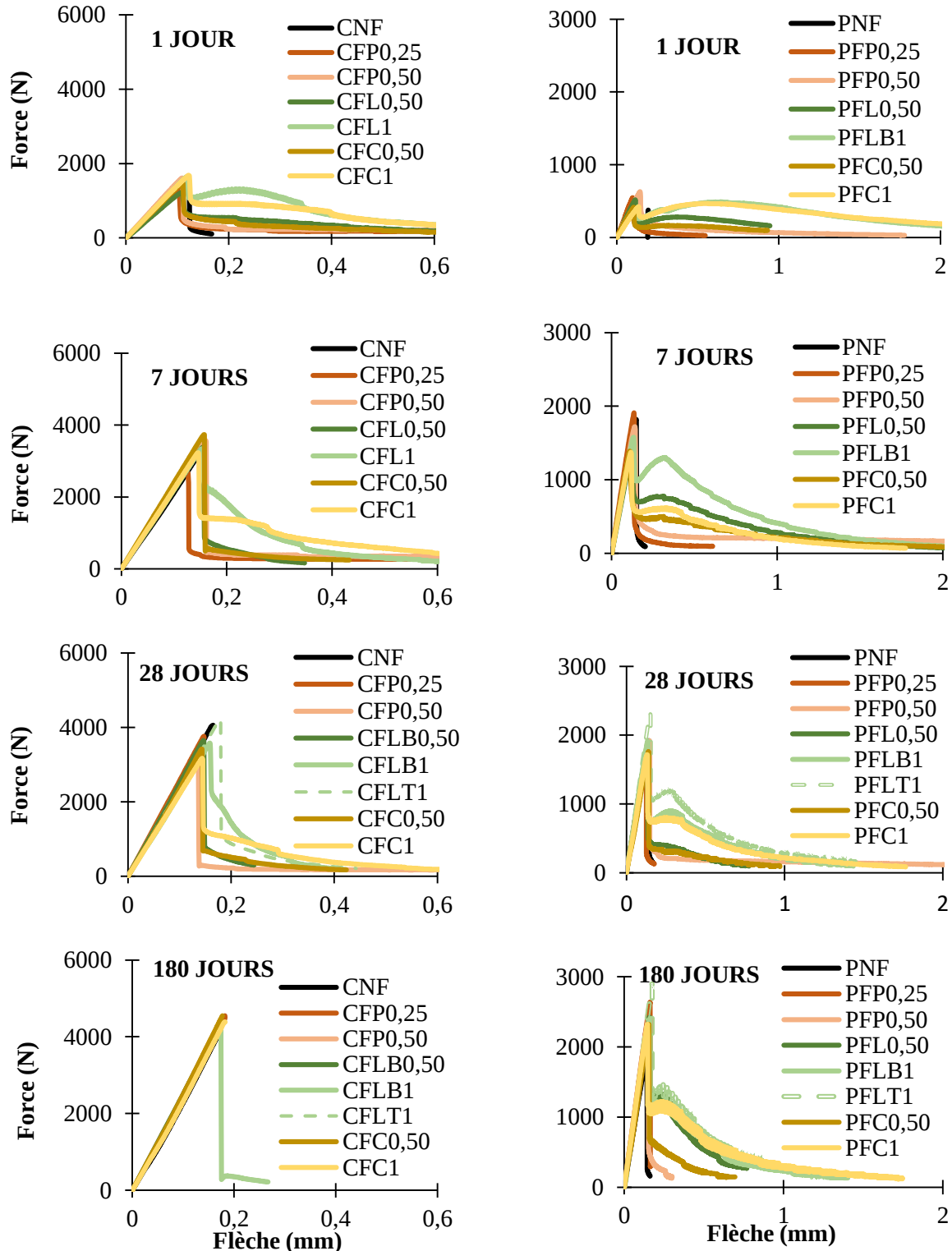


Figure V-21: Courbes force-flèche en flexion 3 points des différents mortiers cimentaires et pouzzolaniques à 1, 7, 28 et 180 jours

Tout d'abord, on peut observer que quelle que soit l'échéance de l'essai, la matrice de référence (cimentaire et pouzzolanique) présente un comportement quasi élastique linéaire fragile. Le

déplacement à la rupture est faible (moins de 0,2 mm pour les deux mortiers). Pour le pic de flexion, il est peu sensible à la présence de fibres ce qui confirme que l'amorce de la fissure ne dépend que de la résistance à la traction de la matrice, la contribution des fibres n'étant effective qu'après l'ouverture de la fissure. Pour le mortier cimentaire de référence, la force maximale en flexion passe de 1000 N à un jour à 4500 N à 180 jours et de 800 N à 2500 N pour le mortier pouzzolanique de référence.

Pour les mortiers fibrés, après la fissuration, les fibres interviennent pour créer un pont entre les lèvres des fissures et cela se traduit par une résistance résiduelle. Le comportement post-pic observé est caractérisé par une décroissance graduelle de la capacité portante avec l'augmentation de la flèche. Cependant, le comportement post-pic présente des écarts significatifs entre les différentes formulations fibrées. Le composite renforcé par les fibres de lin présente une résistance plus importante que celle des fibres de chanvre. Cette différence provient de la mauvaise dispersion due à l'hétérogénéité de longueur des fibres de chanvre. La même observation a été notée au niveau de la résistance à l'impact. L'étude granulométrique a montré qu'une partie des fibres de chanvre a une longueur qui peut atteindre 30 mm. Avec des fibres de plus grande longueur, le phénomène d'agglomération des fibres est davantage présent (Page, 2017a), ce qui peut engendrer des zones avec des boulettes de fibres non-enrobées dans la matrice (Chafei, 2014; Le Hoang, 2013; Magniont, 2010a; Ramakrishna and Thirumalai, 2005b; Sedan, 2007) et donc avec une faible adhérence. Ces observations ont pu être faites également sur les faciès de rupture des essais de notre étude. Les résultats obtenus mettent donc en évidence l'importance du choix de la longueur sur le comportement post-fissuration du mortier et confirment l'observation réalisée par plusieurs auteurs concernant l'existence d'une longueur optimale et qui varie selon le type de fibre (Le Hoang, 2013; Ramakrishna and Thirumalai, 2005b; Sedan, 2007).

En ce qui concerne la teneur en fibres, on peut noter qu'elle a un effet significatif sur le comportement post-pic du matériau. Un dosage en fibres plus important augmente la probabilité de voir une fibre intercepter une fissure ce qui améliore le contrôle de la fissuration. On peut le constater avec les mortiers renforcés par les fibres de chanvre et de lin ; lorsqu'on passe de 0,5% à 1%, la capacité portante post-pic est plus élevée. Cet effet est également visible pour un dosage double en polypropylène mais pour ces mortiers, le comportement post-pic observé présente des résistances résiduelles beaucoup plus faibles.

Il est donc intéressant de noter que l'essai de flexion, s'il est nécessaire et instructif, ne rend pas forcément compte des performances d'un renfort fibré sous une sollicitation différente provoquant aussi la rupture en traction (exemple de l'impact). Le type de sollicitation (progressive ou brutale), l'intensité, la dimension de l'éprouvette et par conséquent l'énergie nécessaire à l'initiation de la fissuration joueraient un rôle sur la capacité des fibres à reprendre ensuite les efforts dans le composite. Il semblerait que le bénéfice soit d'autant plus important que l'initiation de fissure se produirait à un faible niveau de sollicitation. Il faut garder à l'esprit qu'un essai se rapprochant des futures conditions d'utilisation est parfois incontournable pour valider un renfort.

Le comportement mécanique des composites renforcés par les fibres végétales évolue avec l'âge des mortiers. Pour les mortiers cimentaires, on peut constater que la résistance résiduelle s'est détériorée avec le temps à tel point qu'à 180 jours, la différence entre le mortier de référence et les mortiers renforcés par des fibres est à peine perceptible. En effet, certains auteurs ont reporté une minéralisation des fibres par un processus de calcification (A et al., 2001; Sedan, 2007; Tolêdo Filho et al., 2000). On peut dire que dans cet environnement les fibres végétales « se fossilisent ». En effet, la minéralisation et l'attaque alcaline des ions calcium libérés lors de la réaction d'hydratation modifient fortement l'état d'interface fibre/matrice ce qui justifie le passage observé sur le comportement mécanique des composites d'une réponse adoucissante au comportement très fragile similaire à celui du mortier de référence. Le prétraitement des fibres de lin n'a pas permis de modifier cette tendance. Pour les mortiers pouzzolaniques, un comportement totalement différent a été noté. A 180 jours, les mortiers renforcés par des fibres végétales ont gardé un comportement post-pic présentant une résistance résiduelle. Cette conservation montre l'effet favorable de l'utilisation d'un liant pouzzolanique sur la durabilité des fibres

végétales sur le long terme. En effet, la réaction pouzzolanique permet de diminuer l'agressivité alcaline envers les fibres en absorbant les ions calcium provenant de l'hydroxyde de calcium présent dans la chaux d'où le prolongement de la durée d'efficacité des interfaces fibres-matrice et des propriétés des fibres (Magniont, 2010a; Seng, 2018).

4. POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

La **Figure V-22** et la **Figure V-23** montrent les valeurs expérimentales de porosité accessible à l'eau pour toutes les formulations cimentaires et pouzzolaniques à 28 jours. Six essais ont été réalisés pour chaque formulation.

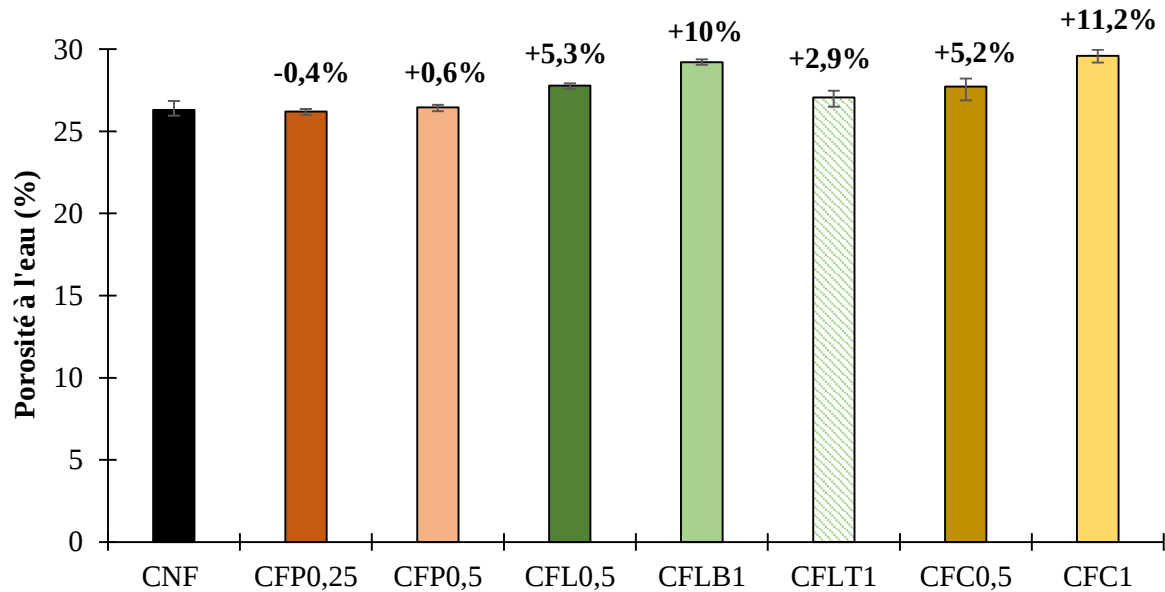


Figure V-22: Porosité accessible à l'eau des formulations cimentaires

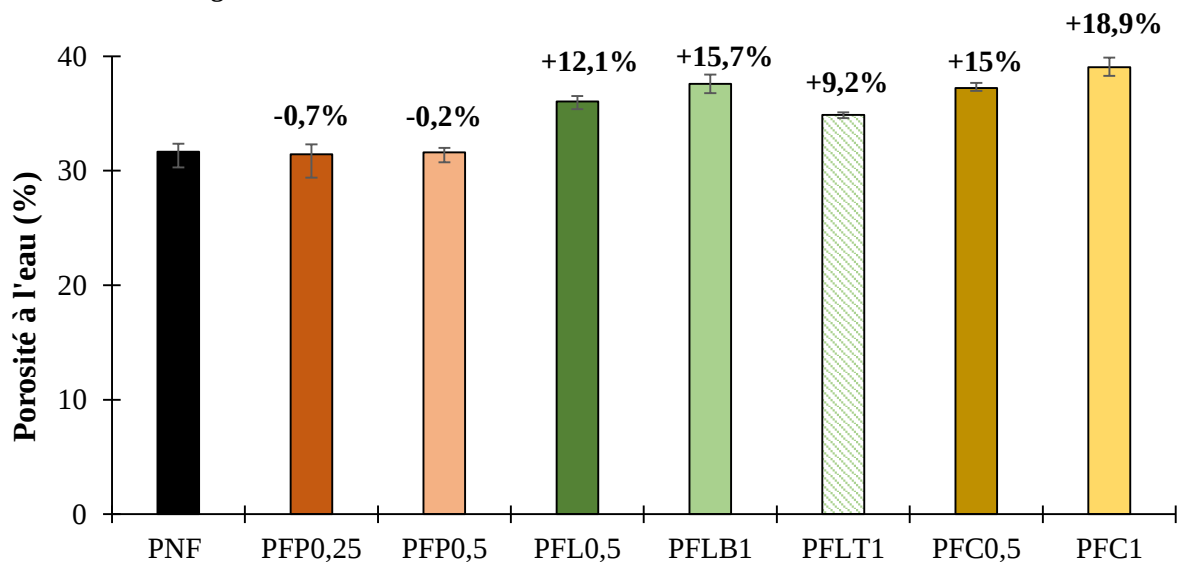


Figure V-23: Porosité accessible à l'eau des formulations pouzzolaniques

Les résultats montrent que les deux mortiers témoins et les formulations renforcées par les fibres polypropylènes ont des porosités quasiment équivalentes. L'ajout de fibres de lin et de chanvre augmente d'une manière significative la porosité de toutes les formulations et celle-ci augmente avec la teneur en fibres. Pour CFL0,5 et PFL0,5, la porosité a augmenté de 5% et de 12% respectivement par

rapport au CNF et PNF. Une augmentation presque similaire a été observée pour CFC0,5 (+5%) et PFC0,5 (+15%). La porosité continue de s'accroître avec un dosage de 1% de fibres (10% pour CFLB1, 16% pour PFLB1, 11% pour CFC1 et 19% pour PFC1). D'autres auteurs ont mentionné une augmentation de la porosité des composites cimentaires et pouzzolaniques lors de l'ajout des fibres végétales (Chiker et al., 2021; Cid et al., 2020; Magniont, 2010a; Page, 2017a). Cette augmentation de la porosité est liée à l'air occlus présent dans le composite et à une porosité importante dans la zone de transition entre la fibre et la matrice. Cette porosité importante provient du caractère hydrophile des fibres avec les effets décrits précédemment.

S'agissant de mortiers renforcés par des fibres de lin traité, on peut noter une augmentation de la porosité de 3% pour CFLT1 et 9% pour PFLT1. Ces valeurs sont plus faibles que celles obtenues dans le cas de CFLB1 et PFLB1. Cette diminution confirme notre observation concernant le caractère hydrophile et son influence sur la structure poreuse du matériau.

La **Figure V-24** et la **Figure V-25** confirment bien la corrélation évoquée précédemment entre la résistance en compression et la porosité des mortiers étudiés.

On peut observer une relation entre la résistance à la compression et la porosité du matériau : une baisse de cette résistance avec une augmentation de la porosité. Les fibres de lin et de chanvre provoquent une perturbation sur les performances mécaniques en compression suite à une modification de l'arrangement granulaire (compacité) qui induit une augmentation de la porosité du matériau. En effet, cette compacité du matériau dépend de l'état de contact entre les grains. Dans le matériau non fibré, les grains se mettent en contact les uns avec les autres tout en laissant un espace inoccupé (pores). Cependant, l'addition des fibres peut perturber cet arrangement en faisant une barrière entre les grains ce qui diminue la densité de contact entre les grains du sable et du liant et par conséquent le volume des pores augmente.

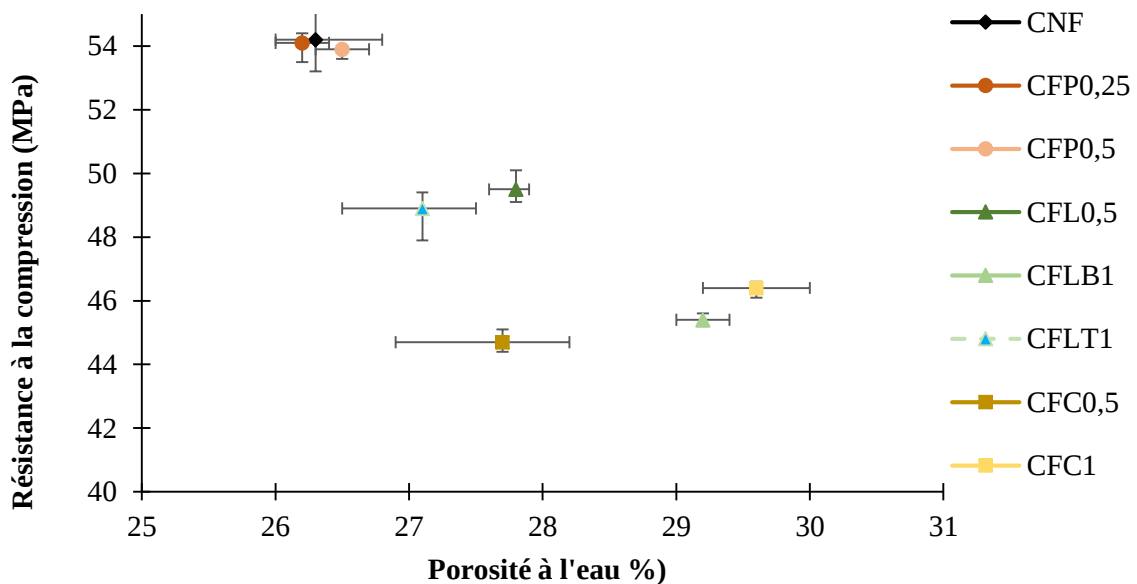


Figure V-24: Résistance à la compression en fonction de la porosité du mortier cimentaire

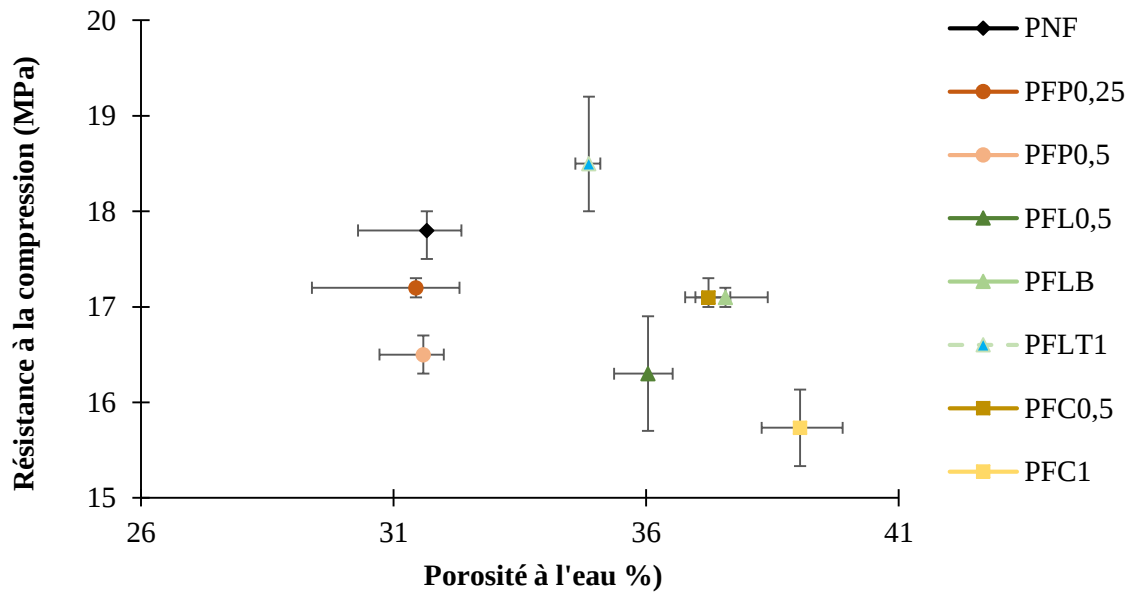


Figure V-25: Résistance à la compression en fonction de la porosité du mortier pouzzolanique

5. CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE DE L'INTERFACE FIBRES/MATRICE

L'analyse de l'interface fibre-matrice est importante pour apporter des précisions sur les mécanismes de rupture et confirmer les hypothèses formulées. Les éprouvettes fibrées ont été observées au MEB à 28 et 180 jours. Les images MEB ont été réalisées après des essais de flexion dans le but d'analyser la section de rupture du composite renforcé par des fibres.

La **Figure V-26** et la **Figure V-27** montrent l'analyse microscopique des zones de rupture pour les formulations cimentaires et pouzzolaniques à 28 jours.

On a utilisé trois grossissements dans le but de regarder plusieurs paramètres (dispersion des fibres, état de surface). Pour les fibres de polypropylène, on peut noter leur aspect monofilamentaire et leur bonne dispersion conformément à la fiche technique transmise par le fournisseur alors que les fibres de lin sont en partie regroupées (**cercles rouges**). On a confirmé cette observation à l'œil nu sur la surface de rupture : les fibres polypropylènes ont une dispersion régulière sur toute la section de l'éprouvette contrairement aux fibres de lin qui ont une répartition hétérogène. Pour les fibres de lin on trouve des couches d'hydrates visibles à la surface des fibres : c'est une preuve de la bonne adhérence entre cette fibre et la matrice (**cercles verts**). On observe aussi que les fibres de lin brutes et traitées ont des états d'interface similaires ce qui justifie l'équivalence obtenue sur le comportement mécanique des mortiers.

La **Figure V-28** et la **Figure V-29** montrent l'analyse microscopique des formulations cimentaire et pouzzolaniques respectivement à 180 jours.

L'analyse microscopique à 180 jours ne montre pas une nette différence entre les fibres de polypropylène et les fibres de lin. On peut noter que l'adhérence fibres polypropylènes/matrice reste bonne et une couche d'hydrates irrégulière est fixée sur la surface des fibres (**cercles oranges**). Pour les fibres de lin (**cercles violets**), on peut remarquer que la morphologie de plusieurs fibres semble s'être dégradée mais des couches d'hydrates irrégulières sont toujours présentes. La dégradation pourrait être liée à la minéralisation superficielle de la surface des fibres ce qui induit une fragilisation de la fibre et par conséquent une tendance à rompre avec en plus une dégradation de l'interface fibres-matrice. Les images n'ont pas permis d'identifier une différence nette d'état en fonction du type de liant. L'analyse montre aussi différents types de pores au sein du composite (**cercles rouges en pointillé**). Tout d'abord, les pores qui résultent de la réaction chimique du liant (absorption d'eau, porosité ouverte, fermée) qu'on

peut observer dans toutes les formulations. En ce qui concerne la fibre de lin, elle absorbe beaucoup d'eau de gâchage et gonfle après son introduction dans le mélange. Ce phénomène implique la création d'une zone poreuse à l'interface fibre-matrice qui peut faciliter son arrachement et une plus faible contribution au transfert d'effort à travers la fissure.

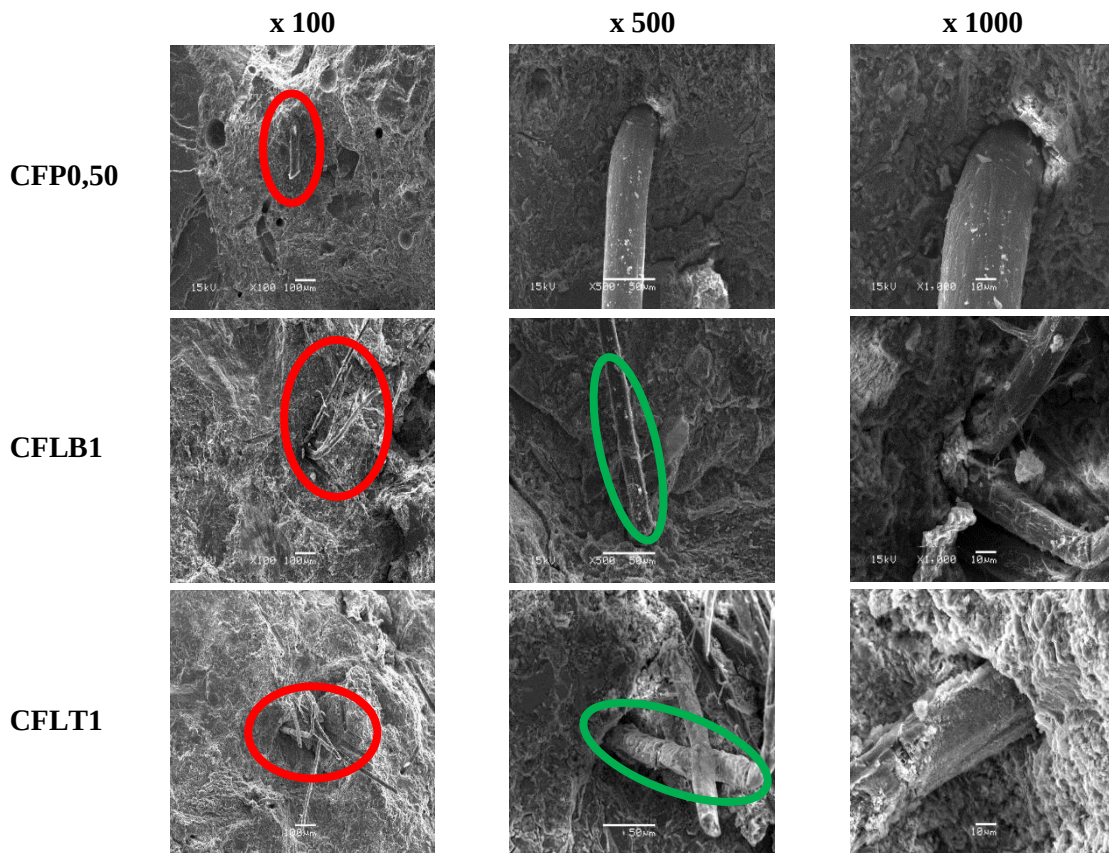
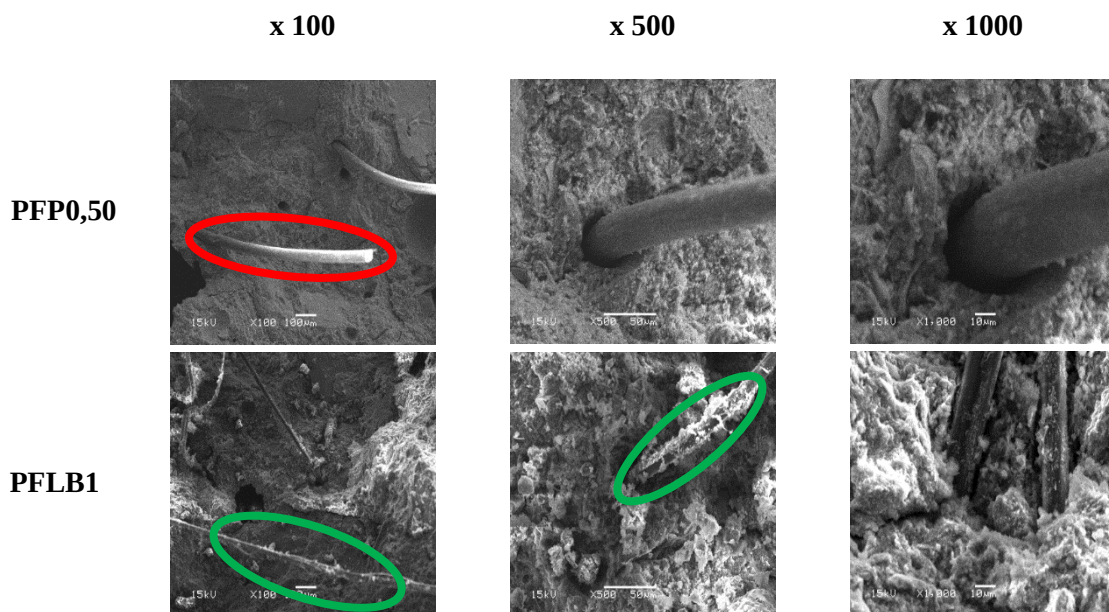


Figure V-26: Analyse MEB du mortier cimentaire à 28 jours avec plusieurs grossissements



PFLT1

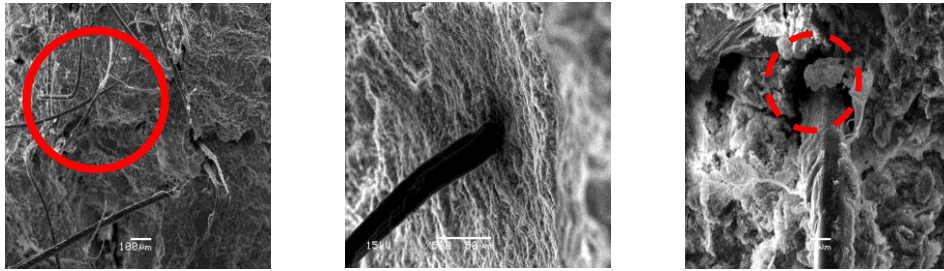


Figure V-27: Analyse MEB du mortier pouzzolanique à 28 jours avec plusieurs grossissements

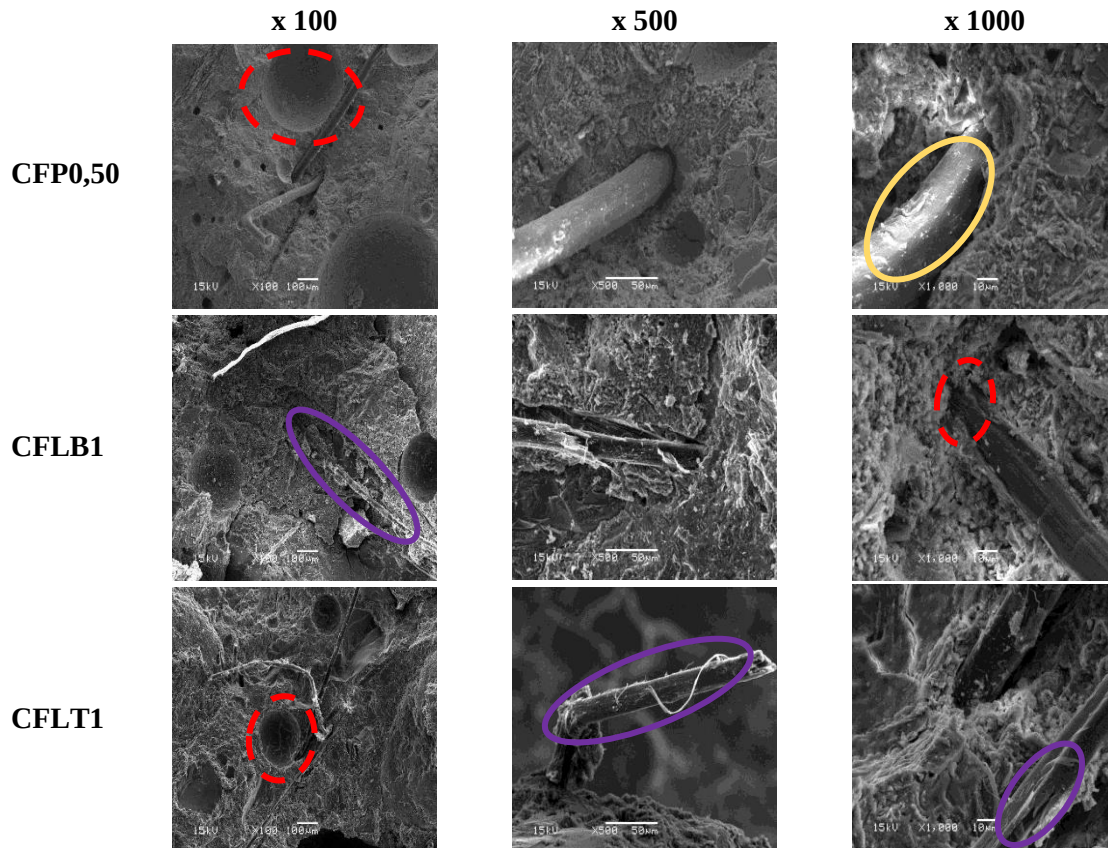
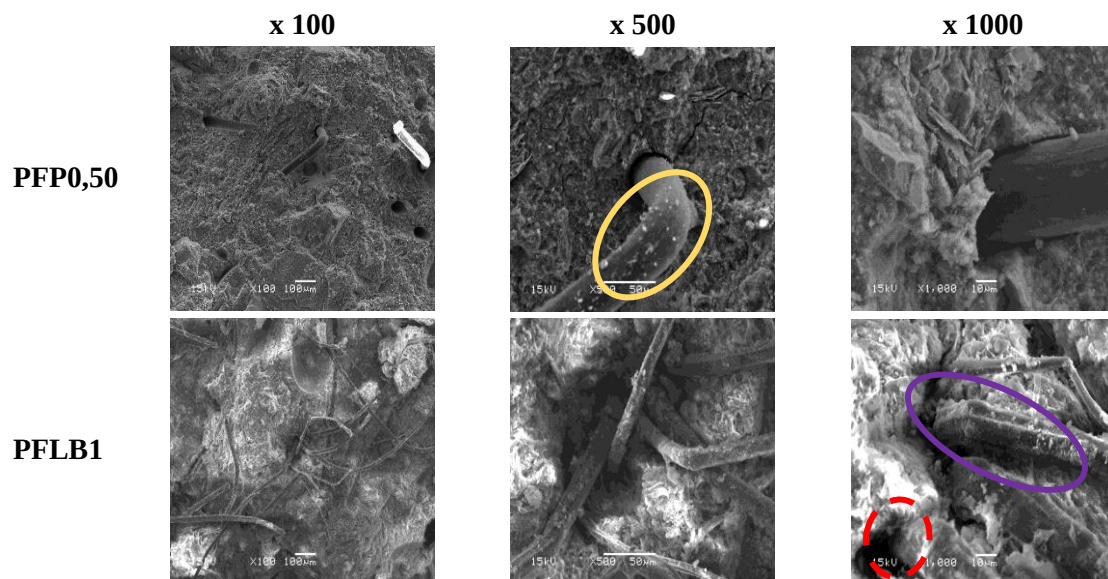


Figure V-28: Analyse MEB du mortier cimentaire à 180 jours avec plusieurs grossissements



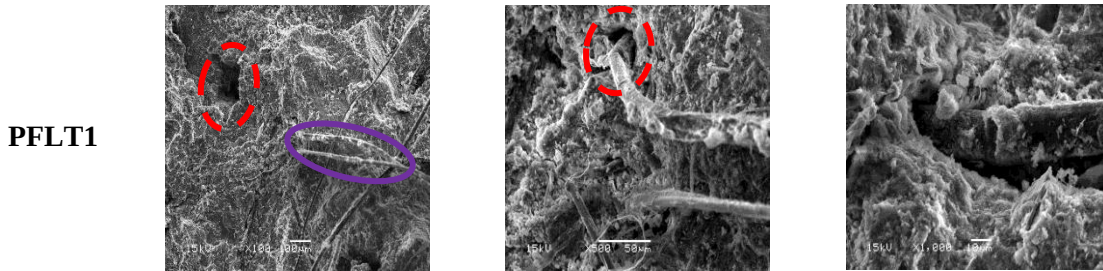


Figure V-29: Analyse MEB du mortier pouzzolanique à 180 jours avec plusieurs grossissements

6. COMPORTEMENT DES MORTIERS FACE A DES HAUTES TEMPERATURES

Etant donné la destination finale des mortiers objet de notre étude (enduits extérieurs et intérieurs), il apparaît indispensable d'évaluer le comportement des propriétés du matériau après exposition à de hautes températures. Nous verrons ici l'influence des fibres végétales toujours en comparaison avec celle des fibres de polypropylène.

6.1. Résumé bibliographique

Les matériaux à la base de liants minéraux sont caractérisés par une microstructure dense et une faible perméabilité. La microstructure dense semble être un point faible pour la stabilité lorsque ces matériaux sont soumis à une température élevée (Ezziane et al., 2015; Gaweska, 2004; Missemmer, 2011). Aujourd'hui, l'addition de fibres en polypropylène dans la composition du matériau est une solution efficace pour donner au composite une bonne stabilité thermique (Rodrigues et al., 2010; Xiao and Falkner, 2006). En effet, les fibres de polypropylène ont une température de fusion relativement basse ($\sim 170^\circ\text{C}$) qui induit la création d'une porosité supplémentaire facilitant le transport d'humidité dans le béton vers l'extérieur et limite ainsi les surpressions dans la matrice (**Figure V-30**).

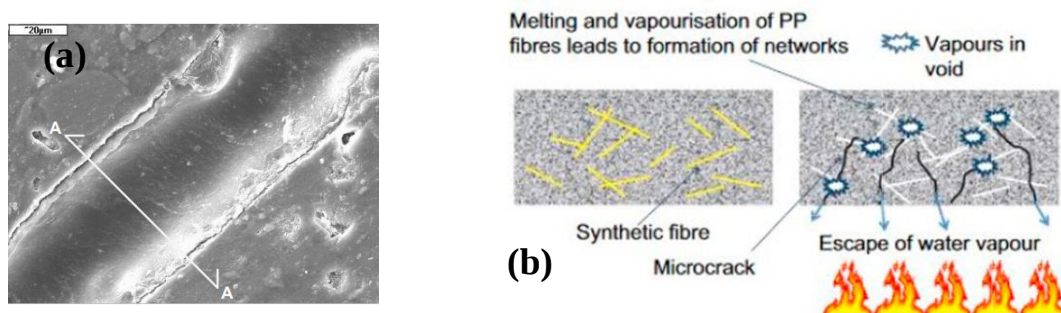


Figure V-30: (a) Fibre polypropylène après le cycle d'échauffement jusqu'à 180°C (Gaweska, 2004) ;
(b) Principe d'action des fibres polypropylènes (Amancio et al., 2018)

La **Figure V-31** présente une comparaison faite par (Amancio et al., 2018) de la surface du béton d'une formulation non fibrée et de 3 formulations renforcées par différentes teneur en fibres de polypropylène ($1,2$; $1,8$; $2,4 \text{ kg.m}^{-3}$) après une exposition à une température de 800°C . Les auteurs ont noté une nette diminution de la densité d'écaillage sur la surface du béton incorporant des fibres polypropylènes, avec contraste plus visible pour un dosage de $2,4 \text{ kg.m}^{-3}$.

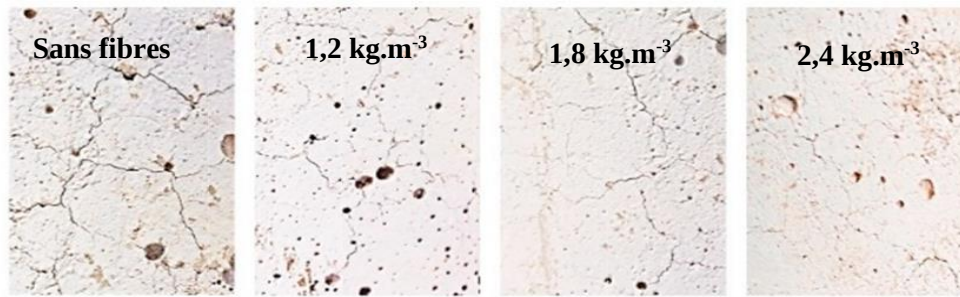


Figure V-31: Surface du béton non fibré et celle des bétons renforcés par des fibres en polypropylène après une exposition à une température de 800 °C (Amancio et al., 2018).

Dans le cas des matériaux contenant des particules végétales, le comportement au feu est très peu étudiée. En effet, les composites biosourcées ont une sensibilité thermique importante qui est conjuguée par dégradation thermique à faible température (Page, 2017). Les fibres végétales se dégradent également à une température faible (Magniont, 2010b; Page, 2017a).

Une étude au feu a été réalisée par (Page, 2017a) sur des bétons qui contiennent des fibres de lin. Après exposition à 300 et 600 °C, l'auteur a observé un maillage de fissure sur la surface du béton contenant des fibres de lin plus significatif que celui du non fibré (**Figure V-32**). En effet, l'écaillage de la surface est lié à la dégradation des hydrates de la pâte de liant et à l'augmentation de la pression dans les pores du matériau (Sakr and EL-Hakim, 2005).

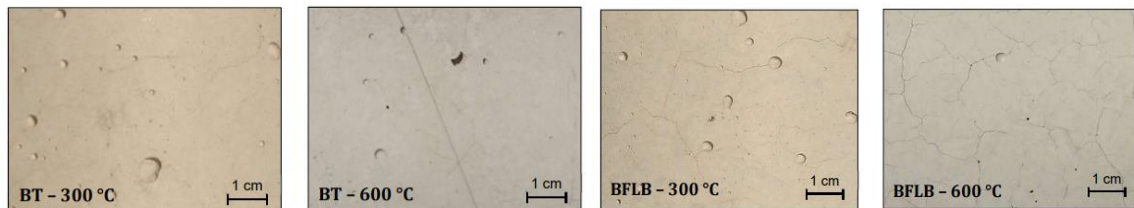


Figure V-32: Ecaillage sur la surface des bétons après exposition à des températures élevées (BT : béton témoin sans fibres; BFLB : béton avec fibres de lin brut) (Page, 2017a)

6.2. Dispositif expérimental

Cette étude a été réalisée sur toutes les formulations définies précédemment. Pour chaque formulation et chaque température testée, 3 éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm³ ont été fabriquées. Le protocole de malaxage est identique à celui des autres essais. Après le démoulage, les éprouvettes ont été stockées dans des sacs étanches pendant 28 jours.

Les formulations ont été exposées à 3 valeurs de température. On a d'abord choisi 200°C en prenant en compte la température de fusion des fibres de polypropylène (environ 170 °C). Ensuite, l'analyse thermogravimétrique des fibres de lin et de chanvre a montré qu'elles subissent une dégradation à 350°C (Magniont, 2010b; Page, 2017a). On a décidé d'exposer toutes les formulations à une température de 400 °C. Finalement, une température de 600 °C a été testée dans le but de travailler dans des conditions plus sévères.

La montée en température a été réalisée à l'aide d'un four de marque Heraeus (**Figure V-33**). La vitesse de chauffage était de 3 °C.min⁻¹, une valeur assez faible pour éviter toute risque d'éclatement du mortier. Une fois la température visée atteinte, celle-ci a été maintenue pendant 6 heures. Ensuite, les éprouvettes ont été maintenues dans le four éteint et entrouvert. Nous avons attendu que la température à l'intérieur du four soit en équilibre avec la température ambiante avant de soumettre les éprouvettes à différents essais.



Figure V-33: Four utilisé pour chauffer les éprouvettes

6.3. Résultats obtenus

6.3.1. Perte en masse

La **Figure V-34** et la **Figure V-35** présentent l'effet de la température sur la perte de masse des mortiers cimentaires et pouzzolaniques. On peut noter que toutes les formulations perdent une masse et que cette perte de masse augmente avec la température. Plus la température augmente, plus la perte en masse devient importante et cette perte varie en fonction de la composition de chaque formulation (liant, fibres).

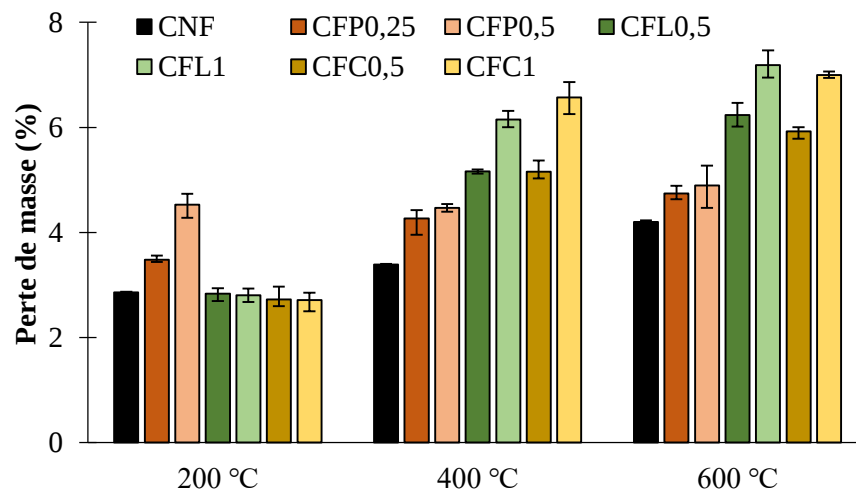


Figure V-34: Perte de masse des formulations cimentaires exposées aux températures élevées

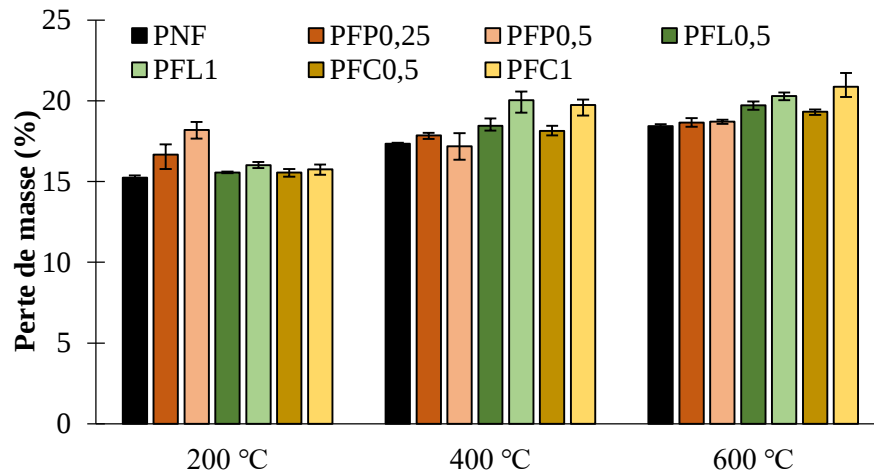


Figure V-35: Perte de masse des formulations pouzzolaniques exposées aux températures élevées

A 200 °C, la perte de masse du CNF est de l'ordre de 2–3% et la même fourchette a été observée pour les formulations cimentaires renforcées par les fibres végétales. Ce résultat montre que les fibres végétales ne sont pas dégradées à cette température. Pour CFP0,25 et CFP0,5, la perte de masse est plus importante, de l'ordre de 3 – 4,5 %. En effet, à 200 °C la déshydratation des C-S-H est déjà en cours (Kodur, 2014; Page, 2017a) ce qui explique la perte pour toutes les formulations. La différence observée pour les formulations renforcées par les fibres polypropylènes correspond à la fusion des fibres à cette température ce qui donne une perte de masse supplémentaire. Pour les mortiers pouzzolaniques, on peut noter la même tendance. Les formulations renforcées par les fibres polypropylènes présentent la perte la plus importante (16-18%) tandis que pour les autres formulations, la perte de masse varie entre 15 et 16%.

A 400 °C, la déshydratation des C-S-H continue. Cette perte explique les résultats observés pour CNF (3-4%), CFP0,25% (4%) et CFP0,50 (4%). Pour les formulations cimentaires renforcées par les fibres de lin et de chanvre, on peut constater une perte de masse plus importante que les autres compositions. La perte de masse est de l'ordre de 5 à 7%. Pour PNF, la perte est de 17% et est équivalente pour PFP0,25 et PFP0,5. Comme les mortiers cimentaires, les mortiers pouzzolaniques renforcés par les fibres végétales enregistrent une perte de masse la plus importante (18-20%). Cette perte correspond à la décomposition des hydrates du ciment mais aussi à la dégradation partielle des fibres végétales. En effet, les analyses thermogravimétrique (ATG) réalisées par (Magniont, 2010b; Page, 2017a) montrent que les constituants chimiques des fibres végétales commencent de se dégrader à partir d'une température qui varie entre 300 et 400 °C ce qui est cohérent avec la perte supplémentaire observée pour ces formulations.

A 600 °C, la perte de masse continue d'augmenter pour toutes les formulations cimentaires et pouzzolaniques. Les formulations de référence enregistrent une perte de masse de 4,2% (CNF) et 18,5% (PNF). Pour CFP0,25 et CFP0,5, la perte de masse varie entre 4 et 5% et entre 18 et 19% pour PFP0,25 et PFP0,5 respectivement. Cette perte correspond encore à la déshydratation des C-S-H et de la portlandite. Pour les formulations cimentaires avec les fibres végétales, la perte de masse varie entre 6 et 7% et entre 19 et 21% pour les pouzzolaniques. Ceci est lié à la dégradation des hydrates, de la portlandite et à la poursuite de la dégradation des fibres végétales.

6.3.2. Porosité à l'eau

La **Figure V-36** et la **Figure V-37** présentent l'évolution de la porosité à l'eau pour les formulations cimentaires et pouzzolaniques en fonction des différentes températures d'exposition. Il convient de noter que la comparaison est basée sur la porosité des formulations à une température donnée.

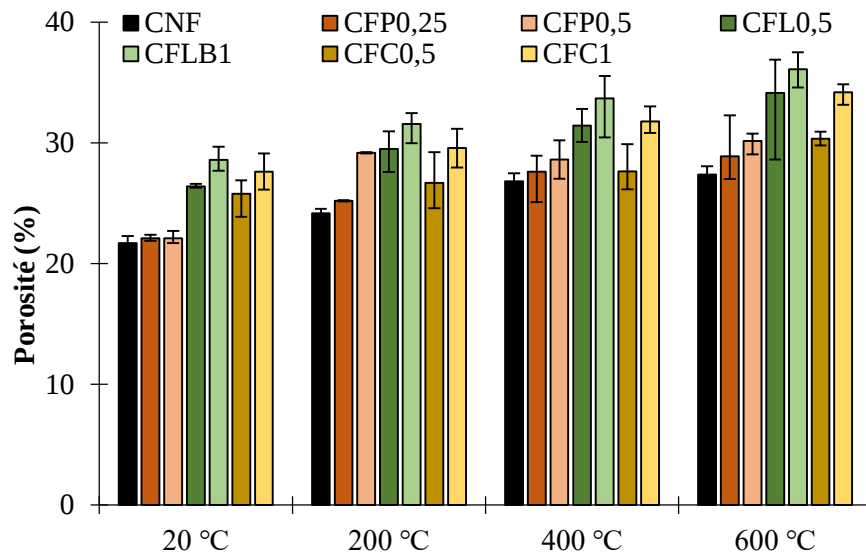


Figure V-36: Porosité à l'eau des mortiers cimentaires en fonction de la température d'exposition

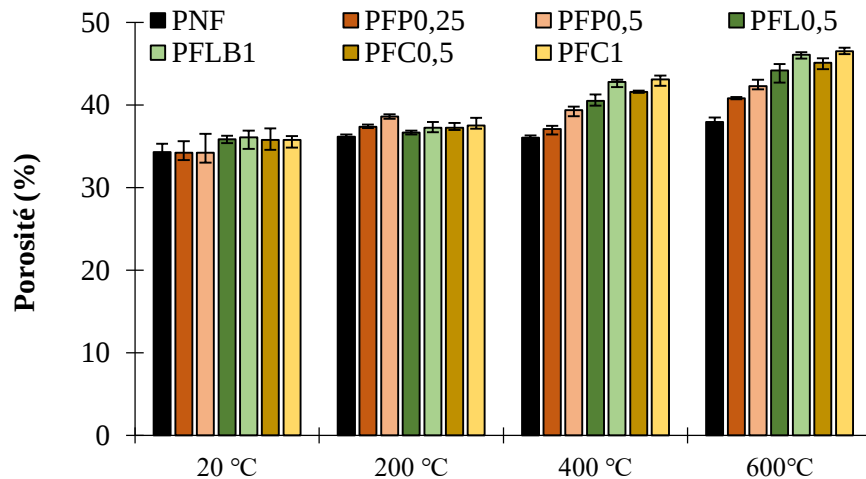


Figure V-37: Porosité à l'eau des mortiers pouzzolaniques en fonction de la température d'exposition

A 20 °C, la porosité des formulations renforcées par les fibres végétales est la plus importante ce qui est en accord avec les résultats précédents (hydrophilie des fibres et relargage de l'eau). La porosité varie entre 26 et 29 % pour CFL, entre 25 et 28 % pour CFC, entre 35 et 36 % pour PFL et PFC. Pour les formulations de référence et celles avec les fibres polypropylènes, on note des porosités du même ordre de grandeur, 21-22 % pour les mortiers à base cimentaire et 34 % pour les mortiers les pouzzolaniques.

A 200 °C, les mortiers de référence ont la porosité la plus faible (24% pour CNF et 36% pour PNF). Pour les mortiers renforcés par les fibres de polypropylène, on note une porosité qui varie entre 25 et 30% pour les cimentaires et entre 37 et 39% pour les pouzzolaniques. Cette augmentation est liée à la fusion des fibres polypropylènes qui permet de créer une porosité supplémentaire. Même si une température de 200 °C ne permet pas de dégrader les fibres végétales, on peut observer une porosité importante pour les formulations renforcées par les fibres de lin et de chanvre (CFL 30-32% ; CFC 27-30% ; PFL et PFC 36-37%). On a déjà expliqué que l'affinité des fibres végétales envers l'eau permet d'augmenter la porosité à l'eau du matériau ce qui peut expliquer ces valeurs importantes par rapport aux autres formulations. De plus, il faut noter aussi que l'augmentation de la porosité ne dépend pas

seulement de la dégradation des fibres. En effet, la variation de la structure poreuse du matériau dépend aussi de la dégradation des C-S-H qui induit une porosité accrue pour toutes les formulations fibrées et non fibrées.

A 400 °C, on peut noter que la porosité de toutes les formulations atteint des valeurs importantes. Les mortiers de référence ont une porosité de 27% (CNF) et 38% (PNF). Pour CFP0,25 et CFP0,5, la porosité varie entre 28 et 29% et entre 38 et 40% pour PFP0,25 et PFP0,5. Les formulations avec les fibres végétales présentent une porosité importante (32-34% pour CFL, 28-32% pour CFC, 40-43% pour PFL et 41-43% pour PFC). A cette température, les fibres végétales commencent de se dégrader en laissant des pores au sein du matériau ce qui explique cette augmentation par rapport aux autres formulations.

A 600 °C, l'évaporation de l'eau dans la structure de C-S-H continue et la dégradation des fibres végétales également. Une porosité de 28% a été observée pour CNF et 39% pour PNF. La porosité des formulations avec les fibres polypropylènes varie entre 29 et 31% pour celles à base cimentaire et entre 42 et 43% pour les pouzzolaniques. On peut mentionner encore une fois que les formulations renforcées par les fibres végétales ont la porosité la plus importante. La porosité est de l'ordre de 34-36% pour CFL, 31-35% pour CFC, 44-46 % pour PFL et PFC. En effet, à 400 °C, les fibres ne semblent pas être dégradées totalement (durée de chauffage insuffisante) et pour cette raison, les fibres continuent leur dégradation à 600 °C ce qui ajoute une porosité supplémentaire au sein du matériau.

6.3.3. Résistance en compression

La **Figure V-38** et la **Figure V-39** montrent la résistance à la compression des formulations cimentaires et pouzzolaniques après l'exposition au chauffage.

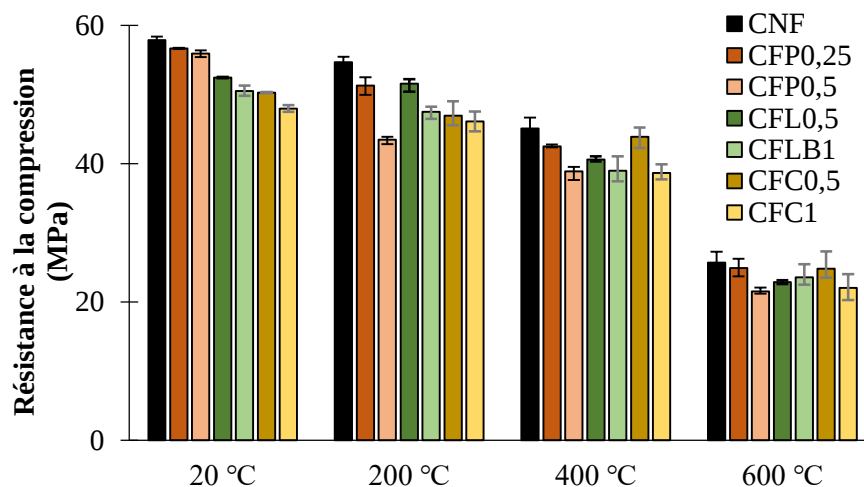


Figure V-38: Résistance à la compression des mortiers cimentaires en fonction de la température d'exposition

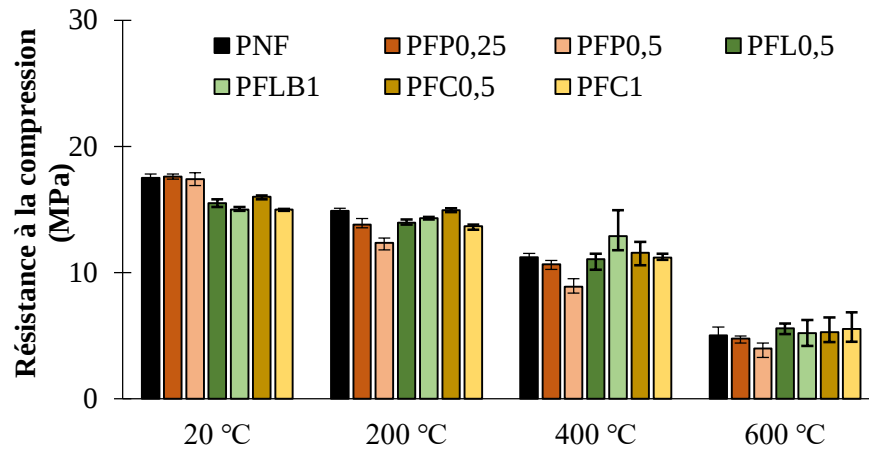


Figure V-39: Résistance à la compression des mortiers pouzzolaniques en fonction de la température d'exposition

Les résultats obtenus montrent que toutes les formulations cimentaires et pouzzolaniques subissent une chute de résistance à la compression en fonction de la température. A 20 °C, les formulations de références et celles renforcées par des fibres de polypropylène ont une résistance du même ordre de grandeur, variant entre 55 et 58 MPa pour les cimentaires et entre 17 et 18 MPa pour les pouzzolaniques. Une perte de la résistance pour les formulations renforcées par les fibres végétales a été observée. Cette diminution varie de 9 à 17% pour CFL et CFC et de 8 à 11 % pour PFL et PFC.

Le **Tableau V-5** et le **Tableau V-6** montrent la perte de résistance en compression en % pour chaque formulation entre la température initiale (20 °C) et la température d'exposition.

Perte de la résistance en compression (perte en % de la résistance à 20°C de la référence)			
	200 °C	400 °C	600 °C
CNF	6	22	56
CFP0,25	11	27	57
CFP0,5	25	33	63
CFL0,5	11	30	61
CFLB1	18	32	60
CFC0,5	19	25	58
CFC1	20	33	62

Tableau V-5 : Perte de la résistance en compression des formulations cimentaires en fonction de la température

Perte de la résistance en compression (perte en % de la résistance à 20°C de la référence)			
	200 °C	400 °C	600 °C
PNF	15	36	71
PFP0,25	21	39	73
PFP0,5	29	49	77
PFL0,5	20	37	68
PFLB1	18	26	70
PFC0,5	15	34	70
PFC1	22	36	68

Tableau V-6 : Perte de la résistance en compression des formulations pouzzolaniques en fonction de la température

En comparant la perte de la résistance à la compression après exposition à différentes températures, on peut observer que toutes les formulations fibrées cimentaires et pouzzolaniques ont eu presque la

même perte à 200, 400 et 600 °C. La perte devient plus importante lorsque la température augmente ce qui correspond à l'évaporation d'eau de la structure C-S-H, la dégradation des fibres et de la portlandite.

A 600 °C toutes les formulations ont eu une baisse de résistance équivalente (60% pour les mortiers cimentaires et 70% pour les pouzzolaniques). Cette chute de résistance est due à la décomposition des hydrates du ciment et à l'augmentation de la porosité du matériau ce qui est en accord avec la structure poreuse décrite précédemment.

6.3.4. Comportement en flexion

La **Figure V-40** montre l'évolution de la force en flexion en fonction de la flèche des formulations cimentaires et pouzzolaniques après l'exposition à différentes températures.

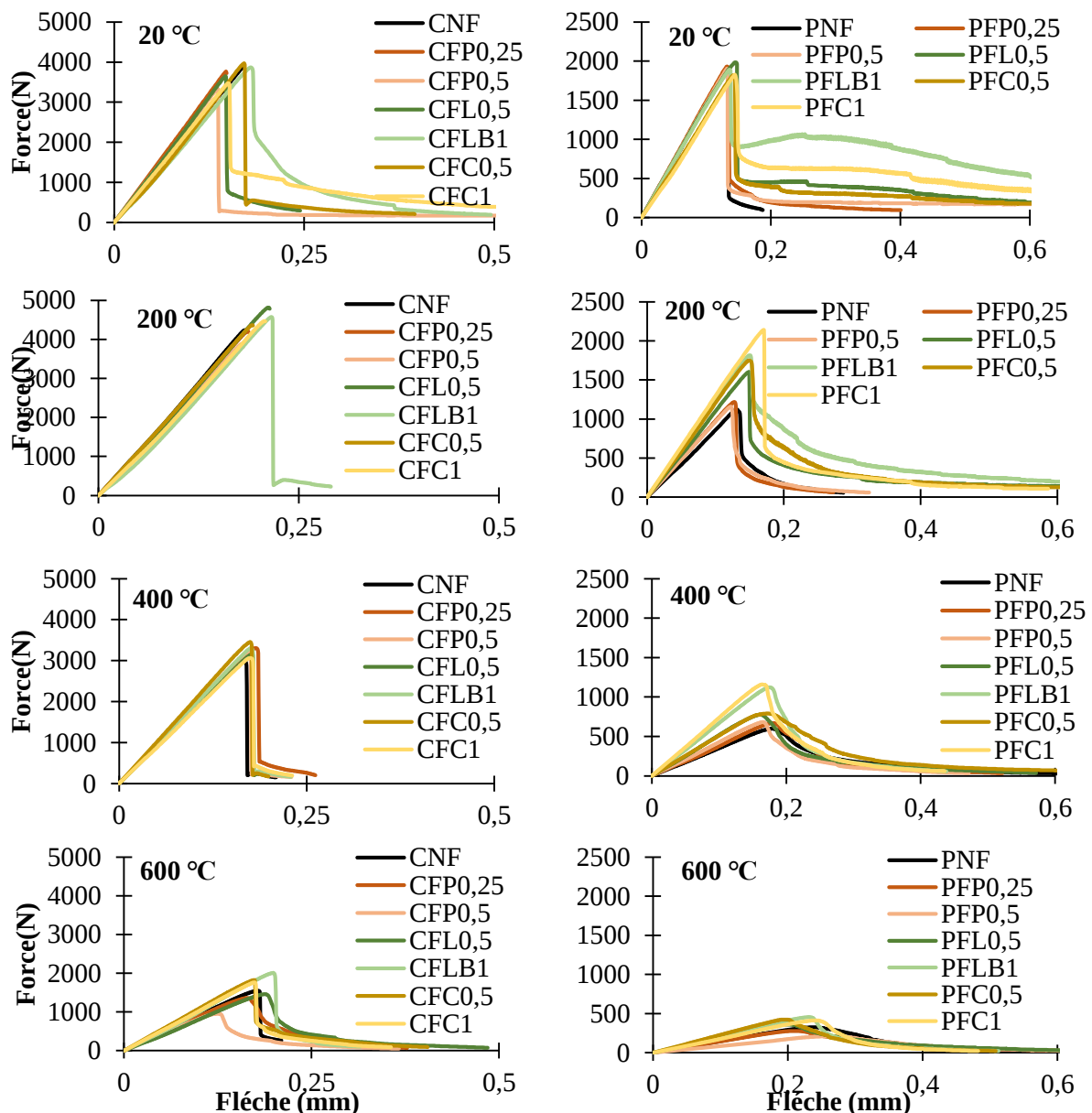


Figure V-40: Comportement en flexion des formulations cimentaires et pouzzolaniques à plusieurs températures d'exposition

Les résultats obtenus montrent que l'exposition des mortiers cimentaires et pouzzolaniques à des hautes températures induisent un comportement altéré en flexion avec une capacité portante maximale qui décroît avec l'augmentation de la température. Afin d'effectuer une comparaison entre les différentes

formulations, on s'est référé au pourcentage de la chute de capacité portante à une température donnée relativement à la capacité portante à (20 °C) (**Tableau V-7 et Tableau V-8**).

Perte de la résistance en flexion (perte en % de la résistance à 20°C de la référence)			
	200 °C	400 °C	600 °C
CNF	1	22	60
CFP0,25	2	15	65
CFP0,5	18	17	75
CFL0,5	0	19	62
CFLB1	2	15	48
CFC0,5	0	11	53
CFC1	0	21	54

Tableau V-7: Perte de la capacité portante en flexion des formulations à base cimentaire en fonction de la température

% de la perte de la force maximale en flexion entre la température désirée et initiale			
	200 °C	400 °C	600 °C
PNF	41	69	83
PFP0,25	37	65	86
PFP0,5	40	65	89
PFL0,5	16	60	81
PFLB1	6	41	76
PFC0,5	9	59	78
PFC1	0	40	79

Tableau V-8: Perte de la capacité portante en flexion des formulations pouzzolaniques en fonction de la température

Comme en compression, la présence de fibres végétales n'est pas plus préjudiciable que les fibres polypropylène vis-à-vis de la résistance à la traction par flexion. Au contraire, on observe un maintien de cette résistance à un niveau plus proche de celle des composites à 20 °C.

6.3.5. Bilan sur les essais à hautes températures

Vis-à-vis de la réponse des composites à haute températures on peut tirer les conclusions suivantes :

- la porosité est plus importante par rapport à celle des mortiers renforcés par des fibres de polypropylènes,
- la résistance de la compression et à la traction par flexion est maintenue à un niveau équivalent, voire plus important à celui des mortiers renforcés par des fibres de polypropylène et malgré une augmentation de la porosité,
- vis-à-vis de l'exposition à de haute température, si on se réfère aux propriétés mécaniques résiduelles après exposition à haute température on peut conclure à un effet « vase d'expansion » équivalent entre les mortiers renforcés par de fibres végétales et ceux renforcés par des fibres polypropylènes. Dans ces conditions les fibres d'origine végétale peuvent avantageusement concurrencer les fibres de polypropylène.

Cependant, nous avons conscience que ces conclusions méritent d'être consolidées par des essais de résistance au feu normalisés et par des analyses à l'échelle microstructurale pour étayer les résultats constatés à l'échelle macroscopique.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a procédé à la caractérisation à l'état durci des différents composites élaborés. Le but était d'évaluer le potentiel des fibres végétales à se substituer aux fibres polypropylènes vis-à-

vis du comportement mécanique (impact, flexion et compression). Les essais mécaniques ont été accompagnés par des mesures de porosité accessible à l'eau ainsi que d'observations microstructurales pour compléter les résultats. Le comportement des mortiers face à des hautes températures a été évalué également.

Les résultats obtenus apportent des éclairages sur plusieurs points.

- la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est pertinente pour détecter les fissures dans le matériau lors d'un essai à l'impact et permet d'avoir des résultats fiables moins sensibles à l'expertise de l'opérateur.
- la résistance à l'impact pour l'apparition de la première fissure est équivalente pour toutes les formulations et aucune différence n'a été observée entre les mortiers de référence et les mortiers renforcés par des fibres.
- les mortiers témoins (CNF et PNF) ont subi une rupture brutale sans aucun contrôle de la fissuration.
- les mortiers renforcés par 0,5 % de fibres de polypropylène sont plus efficaces que les mortiers renforcés par des fibres végétales pour améliorer la résistance à l'impact des composites.
- un dosage de 0,5% de fibres de lin et 1% de fibres de chanvre permet d'avoir une résistance à l'impact similaire à un mortier renforcé par 0,25% de fibres polypropylènes.
- l'incorporation de fibres dans le matériau favorise la multiplication des microfissures avant leur coalescence en macrofissure par l'effet de pontage exercé par les fibres.
- l'état de l'interface fibre-matrice et la bonne dispersion des fibres dans le composite sont des paramètres importants qui gouvernent le comportement du matériau.
- l'ajout de fibres végétales augmente la porosité accessible à l'eau et diminue la résistance à la compression du composite. Cette perte de résistance est suffisamment faible pour ne pas être préjudiciable sur le long terme.
- les essais de flexion 3 points ont montré que l'ajout de fibres ne permet pas de modifier la phase précédent le pic de chargement qui dépend essentiellement des performances de la matrice. En revanche, ce renfort de fibres permet de mieux contrôler la rupture après l'apparition de la première fissure par l'effet de couture de fissure.
- dans le cas des mortiers cimentaires, les fibres végétales se dégradent dans le milieu alcalin tandis que dans le cas des mortiers pouzzolaniques, les fibres continuent à améliorer le comportement du composite à long terme.
- Les fibres végétales peuvent avantager les fibres de polypropylènes vis-à-vis l'exposition des mortiers à des hautes températures.

Finalement, pour une utilisation efficace des fibres végétales dans le mortier vis-à-vis du comportement à l'état durci, les résultats nous permettent d'établir la carte d'identité suivante :

- La longueur des fibres est un paramètre qui contrôle leur distribution et l'état d'ancrage avec la matrice. Avec le type de fibres végétales utilisé, une longueur homogène de fibres végétales comprise entre 10 et 15 mm semble efficace pour assurer un bon comportement mécanique.
- Pour se substituer aux fibres polypropylènes, un dosage double en fibres végétales semble suffisant pour reproduire des performances équivalentes.

Conclusions générales et perspectives

Ce projet de thèse avait pour objectif le développement d'un matériau composite innovant par l'association de fibres végétales et d'une matrice minérale, matériau destiné aux applications en couches minces en enduits intérieurs ou extérieurs. Ses performances ont été analysées en comparaison avec celles obtenues par addition de fibres polypropylènes, solution couramment adoptée aujourd'hui.

Dans un premier temps, un état de l'art a été réalisé sur la valorisation des fibres végétales dans les matériaux de construction. L'objectif de cette partie était de définir les critères du modèle crédible d'incorporation des fibres végétales.

Choix des critères d'incorporation

Les fibres de lin et de chanvre ont été retenues dans cette étude. Ce sont des fibres issues d'une ressource renouvelable cultivée et disponible en France. Elles peuvent être considérées comme un co-produit agricole ou industriel. De plus, ces fibres présentent des propriétés mécaniques comparables à celles des fibres polypropylènes. Cet état des lieux en fait de bons candidats pour une alternative à des fibres polypropylènes.

Concernant la matrice à base des liants minéraux, deux types de liant ont été sélectionnés : un liant cimentaire (le plus utilisé dans le génie civil) et un liant pouzzolanique (solution alternative à plus faible impact environnemental et moins agressive envers les fibres végétales).

Le point de départ pour le choix des longueurs et des dosages est la fibre polypropylène de référence. Présentant une longueur de 12 mm, un dosage classique correspond à 0,25 % en masse de liant. Un dosage fort (0,5 %) a été testé en parallèle. Nous avons choisi de maintenir la longueur et de doubler le dosage en fibres végétales (0,5 et 1 %). Afin de compenser les problèmes classiques de rhéologie, l'ajout d'eau et de superplastifiant a été adopté.

La caractérisation des fibres employées était une étape importante dans cette étude. Les essais de caractérisation ont permis de démontrer que :

- 80% des fibres de lin et 40% des fibres de chanvre ont une longueur qui varient entre 10 et 15 mm,
- La composition chimique des fibres végétales comporte plusieurs éléments : cellulose (~80%), hémicellulose (~9%), lignines (~4% pour le lin et ~2% pour le chanvre), hydrosolubles (~9%),
- les propriétés mécaniques sont adéquates (résistance en traction- σ_{rup} et module d'élasticité -E) (pour le lin : $\sigma_{rup} = 824 \pm 329$ MPa - $E = 39 \pm 16$ GPa ; pour le chanvre : $\sigma_{rup} = 705 \pm 287$ MPa - $E = 47 \pm 26$ GPa ; pour le polypropylène : $\sigma_{rup} = 556 \pm 61$ MPa - $E = 6 \pm 1$ GPa)
- la capacité d'absorption d'eau des fibres végétales est élevée (~150 %),
- Les fibres végétales sont présentes sous forme de faisceaux ou de fibres unitaires ce qui induit une variabilité du diamètre des fibres. Les fibres polypropylènes quant à elle sont présentées sous forme de fibre unifilaire.

Un prétraitement par des cycles (x10) humidification/séchage a été réalisé uniquement sur les fibres de lin. Les essais de caractérisation de la fibre traitée ont permis de constater, par rapport aux fibres de lin brut, une diminution du taux d'hydrosolubles (de 9% à 1%), une réduction de 25% de la capacité d'absorption d'eau ainsi qu'une surface plus propre et plus homogène.

Une fois les propriétés de chaque fibre employée identifiées, nous avons procédé à la caractérisation des mortiers à l'état frais. Trois bilans essentiels ont été tirés.

Bilan sur la rhéologie

La rhéologie des mortiers a été évaluée en s'appuyant sur deux paramètres : le temps d'écoulement et le diamètre d'étalement. Malgré la prise en compte de la quantité d'eau absorbée par les fibres végétales (~150 %), la maniabilité du matériau a été impactée notamment à cause de l'affinité des fibres avec l'eau, à leur grande surface spécifique ainsi qu'à leur mauvaise dispersion dans le matériau. Un ajout d'un superplastifiant fixé à 50% de la masse de fibres a permis de retrouver une maniabilité similaire ($\pm 10\%$) à celle des mortiers de référence. Cette quantité de superplastifiant a été optimisée après plusieurs essais préliminaires. Dans le cas des fibres polypropylènes, la rhéologie est moins affectée par rapport à celle des mortiers de référence.

Bilan sur l'hydratation

L'addition des fibres végétales dans les liants minéraux perturbe le processus d'hydratation en retardant le temps de début de prise, le pic exothermique et en diminuant la quantité de chaleur dégagée. Cette modification est liée aux matières organiques solubles présentes dans les fibres végétales qui peuvent attaquer les grains de liant. L'échange ionique avec la pâte à l'état frais diminue et la formation des hydrates est inhibée. L'ajout des fibres polypropylènes, inerte ne perturbe pas quant à elles la cinétique de l'hydratation du mortier. Le traitement réalisé sur les fibres de lin a permis de diminuer le taux d'hydrosolubles dans la fibre et par conséquent le processus d'hydratation est devenu presque similaire à celui du mortier de référence. On peut cependant conclure que les fibres végétales pénalisent peu l'utilisation du mortier vis-à-vis du temps de début de prise (écart maximal de 20%) et de la quantité de chaleur totale dégagée (écart maximal de 14%). Si ce critère doit être scrupuleusement respecté, le traitement appliqué peut être envisagée comme solution curative.

Bilan sur la variation dimensionnelle (retrait plastique)

Les résultats obtenus sur les essais du retrait plastique se sont avérés quelque peu contradictoires. L'addition des fibres polypropylènes a permis de diminuer la variation dimensionnelle de 29% pour le mortier pouzzolanique et de 21% pour le cimentaire. Cette diminution peut être liée à l'effet des fibres sur l'amélioration de la liaison de contact entre les grains, ce qui les empêchent de se mobiliser. Cependant, les fibres végétales induisent une augmentation du retrait plastique de 27% pour le matériau pouzzolanique et 44% pour le cimentaire. Cette augmentation est liée au phénomène d'absorption puis de relargage d'eau des fibres au jeune âge, causant une variation volumique de leur structure ce qui rend le matériau plus déformable.

Suite à la caractérisation à l'état frais, nous avons poursuivi l'étude par une évaluation de la sensibilité à la fissuration au jeune âge. Cette évaluation a donné lieu au bilan qui suit.

Bilan sur la fissuration au jeune âge

L'addition des fibres (polypropylènes et végétales) induit une diminution de la sensibilité à la fissuration de toutes les formulations. Cependant, cette efficacité dépend de plusieurs paramètres tels que la nature des fibres, leur longueur, le dosage ou le prétraitement. La réduction de la fissuration peut atteindre 90 % pour les fibres végétales, tandis que pour les fibres polypropylènes, la réduction est de 62 %. La réduction est plus marquée avec l'augmentation du dosage en fibres. Dans le cas des fibres de lin traitées, la réduction de la fissuration est environ de 10% par rapport aux fibres de lin brut. Dans cette partie, nous avons mis également en évidence l'importance des paramètres géométriques des fibres. Pour assurer une bonne adhérence fibre/matrice, la longueur des fibres doit être suffisante pour un ancrage permettant un transfert de contraintes à travers la fissure. Une longueur des fibres de 6 mm s'est avérée moins efficace pour contrôler la fissuration.

Après la caractérisation de sensibilité à la fissuration des mortiers, nous avons évalué le comportement mécanique des mortiers à l'état durci. Plusieurs bilans ont été tirés de cette partie.

Bilan sur la résistance à l'impact

Afin d'évaluer l'effet du renfort par des fibres végétales sur la résistance à l'impact du mortier et sur la ténacité, nous avons développé un dispositif expérimental. Le principe de cet essai est de lâcher une bille métallique sur une plaque de mortier pour déterminer l'énergie nécessaire pour l'initiation de la première fissure et l'énergie nécessaire pour conduire cette plaque à la ruine. Afin d'avoir des résultats fiables moins sensibles à l'expertise de l'opérateur, l'initiation de la fissure a été détectée en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.

A 28 jours, l'addition des fibres végétales et polypropylènes améliore significativement la résistance à l'impact des mortiers. Un dosage de 0,5% des fibres polypropylènes s'est avéré le plus efficace avec une réduction qui peut atteindre 1000% pour le mortier pouzzolanique et 900% pour le mortier cimentaire. Pour les fibres végétales, un dosage de 0,5% de fibres de lin et 1% de fibres de chanvre induisent une réduction équivalente à celle des mortiers renforcés par 0,25% de fibres en polypropylènes. Le traitement réalisé sur les fibres de lin a permis une amélioration équivalente avec le lin brut qui vaut environ 620% pour le mortier pouzzolanique et 220% pour le mortier à base de cimentaire.

A 180 jours, les fibres polypropylènes restent les plus efficaces vis-à-vis la résistance à l'impact avec une amélioration de 540% pour le mortier cimentaire et 950% pour le mortier pouzzolanique. Pour les fibres de lin brut et traité, une amélioration équivalente d'environ 95% a été enregistrée dans le cas du mortier cimentaire et 520% pour le mortier pouzzolanique. Le prétraitement des fibres n'est pas bénéfique vis-à-vis de la résistance à l'impact sur le long terme.

La présence des fibres induit une multiplication des microfissures avant leur coalescence en macrofissure par l'effet de pontage. La qualité de ce pontage dépend de l'état de dispersion des fibres dans le composite, de la teneur en fibre, de leur longueur et du type de liant utilisé.

Bilan sur le comportement en flexion, la résistance en compression et de la porosité du matériau à l'état durci

Les essais de traction par flexion ont montré que l'ajout de fibres ne permet pas de modifier la phase précédent le pic de chargement qui dépend essentiellement des performances de la matrice. En revanche, ce renfort de fibres permet de mieux contrôler la rupture après l'apparition de la première fissure par l'effet de couture de fissure. Ce comportement dépend du dosage en fibres, de l'état d'interface fibre-matrice et du type de liant.

L'ajout de fibres végétales augmente la porosité à cause de leur caractère hydrophile et diminue la résistance à la compression du composite. Cette perte de résistance est suffisamment faible pour ne pas être préjudiciable des applications envisagées.

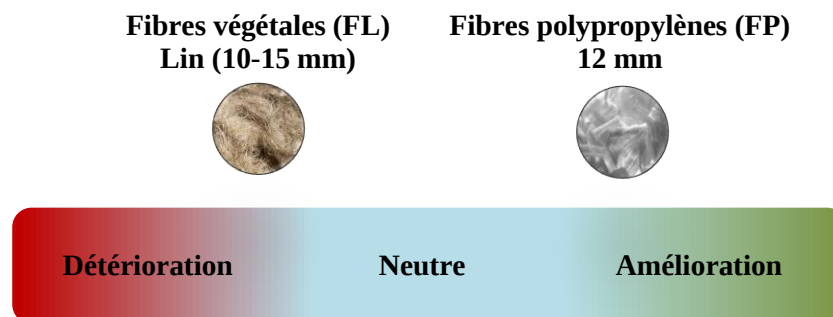
Bilan sur le comportement des mortiers face à des hautes températures

A la suite d'une exposition des mortiers à des hautes températures, nous avons montré qu'en présence des fibres végétales, une résistance résiduelle à la compression et à la traction par flexion est maintenue à un niveau équivalent, voire plus important, à celui des mortiers renforcés par des fibres de polypropylène et ceci malgré une augmentation de la porosité. On peut donc conclure que les fibres végétales confèrent au matériau un effet de « vase d'expansion » équivalent de celui obtenu à la suite de la fonte des fibres polypropylènes. Cette conclusion permet de dire que les fibres végétales peuvent concurrencer les fibres de polypropylène. Ces conclusions doivent être complétées par des essais normalisés de résistance au feu et par des analyses à l'échelle microstructurale pour confirmer les observations constatées.

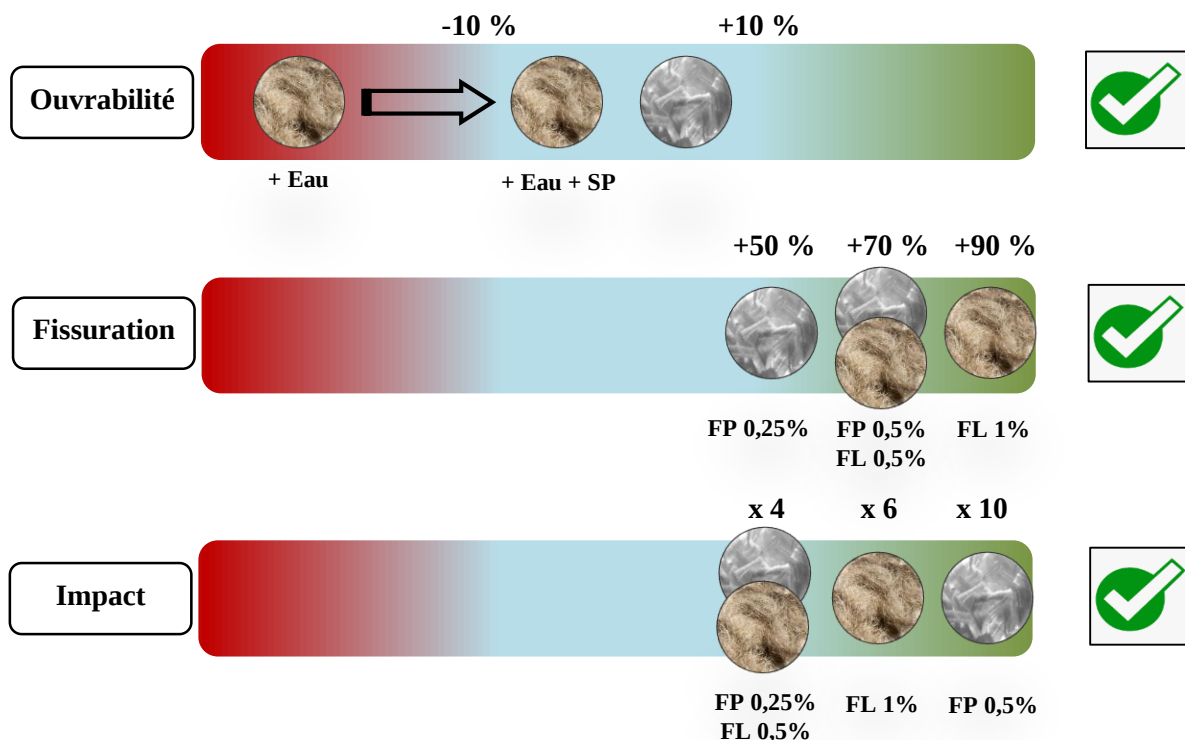
Le but de notre travail était d'étudier la capacité des fibres végétales à se substituer aux fibres polypropylènes. Les axes de travail se sont appuyés sur 3 critères d'utilisations importants pour les fibres polypropylènes. Les critères étaient les suivants :

- maintenir une ouvrabilité équivalente au mortier de référence,
- diminuer la sensibilité à la fissuration au jeune âge,
- augmenter la résistance à l'impact.

Pour résumer les résultats obtenus, le niveau de performances des formulations fibrées par rapport à celle de l'enduit de référence a été repéré par un curseur positionné sur une échelle de performance selon le modèle suivant :



Avec ce modèle, on peut positionner le curseur de chaque type de fibre en se référant sur les résultats obtenus sur chaque critère d'utilisation et en prenant en compte les données de départ qui permettent de choisir une telle configuration.



Le travail réalisé dans cette étude apporte des réponses complémentaires sur la question de la substitution des fibres synthétiques par des fibres naturelles. On peut en conclure que les fibres végétales peuvent concurrencer les fibres polypropylènes. Pour être efficace, cette substitution doit intégrer

certaines paramètres incontournables pour l'auteur. Les résultats obtenus nous permettent donc de créer une fiche technique des fibres qui comporte plusieurs points de vigilance.

Il apparaît important de prendre en considération les paramètres suivants :

- rouissage naturel suffisant et pas de prétraitement supplémentaire des fibres,
- méthode de découpe fiable pour maîtriser la longueur des fibres entre 10 et 15 mm,
- prise en considération de la capacité d'absorption d'eau et ajout de superplastifiant (50% de la masse de fibres ajoutée) si le maintien de l'ouvrabilité est essentiel,
- dosage massique double en fibres végétales par rapport au dosage en polypropylène.

Si nous prenons en compte ces critères simples d'incorporation et que nous changeons le liant et la fibre végétale, peut-on conserver une même performance ? Ce modèle d'incorporation est-il transposable dans un autre contexte où les fibres disponibles sont différentes et le liant utilisé tout autre ? en d'autres termes quelle est la robustesse de ce modèle de substitution de fibres polypropylènes par des fibres végétales.

Perspectives d'études

Les résultats obtenus dans ce projet de recherche ont confirmé le potentiel des fibres végétales à se substituer aux fibres polypropylènes. Cependant, cette capacité dépend de plusieurs paramètres abordés précédemment. Les résultats obtenus permettent de se poser des questions sur plusieurs points dont les futures recherches doivent tenir compte pour compléter les apports déjà réalisés lors de ce projet.

Les propositions sont les suivantes :

- analyser l'état de dispersion des fibres dans le mélange à l'état frais et voir si une découpe plus fine et/ou plus précise permettrait de s'affranchir de l'utilisation de superplastifiant,
- étudier l'effet de la méthode de malaxage et du type de malaxeur sur les propriétés rhéologiques des mortiers selon les fibres afin de valider une incorporation in situ aisée,
- évaluer l'adhérence de la fibre avec la matrice et son évolution avec le durcissement de la matrice,
- mettre en évidence l'influence du caractère hydrophile des fibres végétales sur la sensibilité à la fissuration au jeune âge (action sur le retrait plastique et sur la fissuration provenant plutôt de l'absorption d'eau, de la géométrie, de l'adhérence ou de la dispersion),

Étant donné que les fibres végétales sont utilisées pour une amélioration de l'impact environnemental des matériaux de construction, un volet Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un prérequis pour faire un bilan factuel sur la mise en œuvre des fibres végétales comme renfort des mortiers en lieu et place de fibres polypropylènes.

Listes des références

A, R.D.T.F., B, K.G., Engl, G.L., D, K.S., 2001. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability.

A.Abusogi, M., Bakri, M., 2022. Behaviour of cementitious composites reinforced with polypropylene fibres using restrained eccentric ring test. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00841. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00841>

ABQ, 2005. Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton. Association béton Québec, Montréal.

Acker, P., Michaud-Poupardin, V., 2002. Limiter la fissuration : conditions indispensables à la durabilité des structures en béton 12.

ADEME, 2018. Bilan 2018 de l'ADEME [WWW Document]. ADEME Presse. URL <https://presse.ademe.fr/2019/03/bilan-2018-de-lademe.html> (accessed 3.30.22).

Akhmetov, D., Akhazhanov, S., Jetpisbayeva, A., Pukharenko, Y., Root, Y., Utepov, Y., Akhmetov, A., 2022. Effect of low-modulus polypropylene fiber on physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00814. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00814>

Al-Tayyib, A.J., Al-Zahrani, M.M., Rasheeduzzafar, Al-Sulaimani, G.J., 1988. Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the Arabian Gulf environment. *Cement and Concrete Research* 18, 561–570. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90049-X)

Al-Tulaian, B.S., Al-Shannag, M.J., Al-Hozaimy, A.R., 2016. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials* 127, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>

Amancio, F.A., de Carvalho Rafael, M.F., de Oliveira Dias, A.R., Bezerra Cabral, A.E., 2018. Behavior of concrete reinforced with polypropylene fiber exposed to high temperatures. *Procedia Structural Integrity, XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR, FLORENCE, ITALY, JUNE 20-22, 2018* 11, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.013>

Amziane, S., Arnaud, L., Van Damme, H.P., 2013. Les bétons de granulats d'origine végétale: application au béton de chanvre. *Hermes science publications : Lavoisier, Paris, France*.

Araya-Letelier, G., Antico, F.C., Parra, P.F., Carrasco, M., 2017. Fiber-Reinforced Mortar Incorporating Pig Hair. *AEF* 21, 219–225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.21.219>

Ardanuy, M., Claramunt, J., García-Hortal, J., Barra Bizinotto, M., 2011. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. *Cellulose* 18, 281–289. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>

Arrakhiz, F.Z., Malha, M., Bouhfid, R., Benmoussa, K., Qaiss, A., 2013. Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated alfa, coir and bagasse reinforced polypropylene. *Composites Part B: Engineering* 47, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.046>

Asmaro, W.P., 2013. Identification of concrete fracture parameters using digital image correlation and inverse analysis 301.

- Asprone, D., Durante, M., Prota, A., Manfredi, G., 2011. Potential of structural pozzolanic matrix–hemp fiber grid composites. *Construction and Building Materials* 25, 2867–2874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.046>
- ASTM C1579, 2006. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert).
- Aziz, M.A., 1984. New Reinforced Concretes 3. Concrete reinforced with natural fibres.
- Badagliacco, D., Megna, B., Valenza, A., 2020. Induced Modification of Flexural Toughness of Natural Hydraulic Lime Based Mortars by Addition of Giant Reed Fibers. *Case Studies in Construction Materials* 13, e00425. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00425>
- Baley, C., 2004a. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites 37.
- Baley, C., 2004b. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Plastiques et composites*. <https://doi.org/10.51257/a-v3-am5130>
- Baley, C., 2002. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase [WWW Document]. URL (accessed 1.24.22).
- Ballesteros, J.E.M., Mármol, G., Filomeno, R., Rodier, L., Savastano, H., Fiorelli, J., 2019. Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials* 205, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007>
- Ballesteros, J.E.M., Santos, S.F., Mármol, G., Savastano, H., Fiorelli, J., 2015. Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. *Construction and Building Materials* 100, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.044>
- Banthia, N., Gupta, R., 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research* 36, 1263–1267. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.010>
- Banthia, N., Sheng, J., 1996. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites* 18, 251–269. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00030-5)
- Bao, H., Yu, M., Chi, Y., Liu, Y., Ye, J., 2021. Performance evaluation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under supercritical carbonation. *Journal of Building Engineering* 43, 103159. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103159>
- Baroghel-Bouny, V., 1994. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances (phdthesis). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Bentur, A., Mindess, S., 2007. Fibre reinforced cementitious composites, 2. ed. ed, Modern concrete technology series. Taylor & Francis, London.
- Bertelsen, I.M.G., Kragh, C., Cardinaud, G., Ottosen, L.M., Fischer, G., 2019a. Quantification of plastic shrinkage cracking in mortars using digital image correlation. *Cement and Concrete Research* 123, 105761. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.006>
- Bertelsen, I.M.G., Ottosen, L.M., Fischer, G., 2020. Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials* 230, 116769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>
- Bertelsen, I.M.G., Ottosen, L.M., Fischer, G., 2019b. Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation. *Construction and Building Materials* 199, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.268>

- bilodeau, A., 2004. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire - ScienceDirect [WWW Document]. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946503000854> (accessed 1.26.22).
- Bledzki, A., 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 24, 221–274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)
- Boghossian, E., Wegner, L.D., 2008. Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Composites* 30, 929–937. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.003>
- Booya, E., Gorospe, K., Ghaednia, H., Das, S., 2019. Free and restrained plastic shrinkage of cementitious materials made of engineered kraft pulp fibres. *Construction and Building Materials* 212, 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.296>
- Borg, R.P., Baldacchino, O., Ferrara, L., 2016. Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 108, 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>
- Boshoff, W., Combrinck, R., 2013. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research* 48, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.02.003>
- Bourmaud, A., Morvan, C., Bouali, A., Placet, V., Perré, P., Baley, C., 2013. Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers. *Industrial Crops and Products* 44, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.031>
- BOUTOUIL, M., Khadraoui, F., Tung, 2012. Mechanical and microstructural characterization of flax fibre-reinforced cement composite.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S.Y., Taylor, C., 2016. Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage. *Cement and Concrete Composites* 74, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.004>
- Briffaut, M., 2010. Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton : influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures (phdthesis). École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- Buch, N., Rehman, O.M., Hiller, J.E., 1999. Impact of Processed Cellulose Fibers on Portland Cement Concrete Properties. *Transportation Research Record* 1668, 72–80. <https://doi.org/10.3141/1668-11>
- Cabrera, J., Rojas, M.F., 2001. Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system. *Cement and Concrete Research* 31, 177–182. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00456-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00456-7)
- Canovas, M.F., Selva, N.H., Kawiche, G.M., 1992. New economical solutions for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibres. *Materials and Structures* 25, 417–422. <https://doi.org/10.1007/BF02472258>
- Caramaro, L., 2005. Fibres et fils à usage technique. *Textiles industriels*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-n2510>
- CELC Masters of Linen, 2010. Le lin et le chanvre européen. Consulté 12 novembre 2014, à l'adresse www.mastersoflinen.com.
- Chafei, S., 2014. Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin (These de doctorat). Caen.

- Charlet, K., 2008. Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques 182.
- Chemkhi, S., 2008. Séchage d'un milieu déformable non saturé: Modélisation du couplage hygromécanique 135.
- Chiker, T., Belkadi, A.A., Aggoun, S., 2021. Physico-chemical and microstructural fire-induced alterations into metakaolin-based vegetable and polypropylene fibred mortars. *Construction and Building Materials* 276, 122225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122225>
- Choi, S.-J., Hong, B.-T., Lee, S.-J., Won, J.-P., 2014. Shrinkage and corrosion resistance of amorphous metallic-fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures* 107, 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.010>
- Cid, S.C.G., Cardoso, D.C.T., Silva, F. de A., Krause, J.Q., 2020. Influence of hornification on the physical and flexural properties of Moso bamboo. *Construction and Building Materials* 248, 118701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118701>
- CIMBETON, 2013. Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre - CT G11 [WWW Document]. Infociments. URL <https://www.infociments.fr/fiches-techniques-2-les-betons-formulation-fabrication-et-mise-en-oeuvre> (accessed 11.29.21).
- Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J.A., 2010a. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers* 79, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.057>
- Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J.A., 2010b. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers* 79, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.057>
- Cortas, R., 2012. Nouvelle approche expérimentale pour la maîtrise de la fissuration du béton jeune : influence de la nature et de la saturation des granulats (These de doctorat). Ecole centrale de Nantes.
- Daniel, J.I., Gopalaratnam, V.S., Galinat, M.A., 2002. Report on Fiber Reinforced Concrete 66.
- Deloitte, 2016. bio by deloitte fibres recherche et developpement 2016 [WWW Document]. URL (accessed 11.24.21).
- Deshayes, P., 2012. Abstract. *Innovations* 37, 219–236.
- Dhakar, H.N., Zhang, Z.Y., Richardson, M.O.W., 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology* 67, 1674–1683. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019>
- Dinh, T.M., 2014. Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant (These de doctorat). Toulouse 3.
- Ezziane, M., Molez, L., Messaoudene, I., Kadri, T., Jauberthie, R., 2015. Caractérisations non destructive de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température, in: NoMaD 2015 : Nouveau Matériaux et Durabilité, NoMaD 2015. Douai, France.
- Faraj, R.H., Sherwani, A.F.H., Daraei, A., 2019. Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *Journal of Building Engineering* 25, 100808. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100808>
- FEBELCEM, 2001. Le retrait dans le béton jeune en cours de durcissement.

- Ferreira, S., Silva, F., Lima, P., Toledo Filho, R., 2016. Effect of Natural Fiber Hornification on the Fiber Matrix Interface in Cement Based Composite Systems. *Key Engineering Materials* 668, 118–125. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.118>
- Ferreira, S.R., Lima, P.R.L., Silva, F.A., Toledo Filho, R.D., 2012. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. *Matéria (Rio de Janeiro)* 17, 1024–1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>
- Ferreira, S.R., Silva, F. de A., Lima, P.R.L., Toledo Filho, R.D., 2017. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. *Construction and Building Materials* 139, 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>
- Filho, R.D.T., Ghavami, K., England, G., Scrivener, K., 2003. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5)
- Filho, R.D.T., Sanjuán, M.A., 1999. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. *Cement and Concrete Research* 29, 1597–1604. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00136-2)
- Fisher, V.F., 1974. The water soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards.
- Fourdrin, E., Guigo, C., Chappuis, J., 2000. s. Early age shrinkage of mortars : conception of a new device and detailed analysis of a typical experimental curve. In *Shrinkage 2000, Proceedings of the International RILEM Workshop*. RILEM.
- Frías, M., Cabrera, J., 2001. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C. *Cement and Concrete Research* 31, 519–527. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00465-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00465-8)
- Fujiyama, R., Drwish, F., Pereira, M., 2014. Mechanical characterization of sisal reinforced cement mortar. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 4, 061002–061007. <https://doi.org/10.1063/2.1406102>
- Gaël, B., Christelle, T., Gilles, E., Sandrine, G., Tristan, S.-F., 2016. Determination of the proportion of anhydrous cement using SEM image analysis. *Construction and Building Materials* 126, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.037>
- Garcia-, C., Jaldon, Dupeyre, D., Vignon, M.R., 1998. Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment. *Biomass and Bioenergy* 14, 251–260. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10039-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10039-3)
- Gaweska, I., 2004. Thermal behavior of high performance concretes at high temperature - evolution of mechanical properties 184.
- Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Plamondon, M., Lura, P., 2019. On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 115, 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.015>
- Gopalartnam, V., Shah, S., 1986. Properties of fibre reinforced concrete subjected to impact loading.
- Gorshkova, T., Morvan, C., 2006. Secondary cell-wall assembly in flax phloem fibres: role of galactans. *Planta* 223, 149–158. <https://doi.org/10.1007/s00425-005-0118-7>
- Gourier, C., 2016. Contribution à l'étude de matériaux biocomposites à matrice thermoplastique polyamide-11 et renforcés par des fibres de lin (These de doctorat). Lorient.

- Govin, A., Peschard, A., Guyonnet, R., 2006. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and Concrete Composites* 28, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>
- Gram, H., E., 1983. Durability of Natural Fibres in Concrete.
- Grégoire, M., 2021. Extraction des fibres de chanvre pour des composites structuraux - Optimisation du potentiel mécanique des fibres pour des applications concernant des matériaux composites 100% bio-sourcés (These de doctorat). Toulouse, INPT.
- Guiraud, 2018. Bétons fibrés [WWW Document]. Infociments. URL <https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres> (accessed 11.29.21).
- Hepworth, D.G., Bruce, D.M., Vincent, J., Jeronimidis, G., 2000. Manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites. *Journal of Materials Science* 35, 293–298. <https://doi.org/10.1023/A:1004784931875>
- Ho, A. cuong, 2010. Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés. : application aux éléments de grande surface. (These de doctorat). Toulouse, INSA.
- John, M.J., Anandjiwala, R.D., 2009. Chemical modification of flax reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.01.007>
- Jones, S., 2020. Quand la construction durable profite à la fois à la planète et au BTP. Redshift FR. URL <https://redshift.autodesk.fr/construction-durable/> (accessed 3.30.22).
- Jörg Müssig, H.H., 1999. Caractérisation des fibres de chanvre.
- Juárez, C., Durán, A., Valdez, P., Fajardo, G., 2007. Performance of “Agave lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and Environment* 42, 1151–1157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.005>
- Juarez, C.A., Fajardo, G., Monroy, S., Duran-Herrera, A., Valdez, P., Magniont, C., 2015. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. *Construction and Building Materials* 91, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.028>
- Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization, in: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. Presented at the ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, IEEE, Perth, WA, Australia, pp. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Khelifa, M.R., 2017. Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables (These de doctorat). Cergy-Pontoise.
- Kim, J.-H.J., Park, C.-G., Lee, Si-Won, Lee, Sang-Woo, Won, J.-P., 2008. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering* 39, 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.05.001>
- Kodur, V., 2014. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *ISRN Civil Engineering* 2014, e468510. <https://doi.org/10.1155/2014/468510>
- Kouta, N., 2020. Comportement mécanique et caracterisation : durabilité de nouveaux matériaux a base d'argile (These de doctorat). Bordeaux.

- Kouta, N., Saliba, J., Saiyouri, N., 2020. Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Construction and Building Materials* 254, 119315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119315>
- Kovler, K., Roussel, N., 2011. Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research* 41, 775–792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.009>
- Kriker, A., Debicki, G., Bali, A., Khenfer, M.M., Chabannet, M., 2005. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites, Natural fibre reinforced cement composites* 27, 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.015>
- Langhelle, O., 1999. Sustainable Development: Exploring the Ethics of Our Common Future. *International Political Science Review* 20, 129–149. <https://doi.org/10.1177/0192512199202002>
- Lanier, E.H., Becherec, O., Boyeux, B., 2008. Impacts environnementaux et sanitaires des matériaux chanvre.
- Le Hoang, T., 2013. Etude de caractérisation du comportement de composites cimentaires incorporant des fibres courtes de lin (These de doctorat). Caen.
- Le Hoang, T., 2012. ResearchGate [WWW Document]. URL https://www.researchgate.net/publication/257890900_Mechanical_and_microstructural_characterization_of_flax_fibre-reinforced_cement_composite/link/5e9dc7f192851c2f52b5fdf5/download (accessed 1.27.22).
- Le service des données et études statistiques, 2019. SDES
- Lee, S.-J., Won, J.-P., 2016. Shrinkage characteristics of structural nano-synthetic fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures* 157, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.001>
- Leemann, A., Nygaard, P., Lura, P., 2014. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites* 46, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.002>
- Leong, G.W., Mo, K.H., Loh, Z.P., Ibrahim, Z., 2020. Mechanical properties and drying shrinkage of lightweight cementitious composite incorporating perlite microspheres and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials* 246, 118410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118410>
- Lewin, M. (Ed.), 2006. Handbook of Fiber Chemistry, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420015270>
- Li, Z., Wang, L., Wang, X., 2004. Compressive and flexural properties of hemp fiber reinforced concrete. *Fibers and Polymers* 5, 187–197. <https://doi.org/10.1007/BF02902998>
- Li, Z., Wang, X., Wang, L., 2006. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37, 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.032>
- Liu, X., Ye, G., De Schutter, G., Yuan, Y., Taerwe, L., 2008. On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cement and Concrete Research* 38, 487–499. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.010>
- Lumingkewas, R.H., 2015. Development of materials for construction with low environmental Impact made with low content of cement and with natural fibers 233.

- Magniont, C., 2010a. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Magniont, C., 2010b. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources (These de doctorat). Toulouse 3.
- Malloy, J., 2019. Development of a Mix Design Adjustment Method For Fiber Reinforced Concrete and Super High Performance Concrete Based on Excess Paste 154.
- Mansur, M.A., Aziz, M.A., 1982. A study of jute fibre reinforced cement composites. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 4, 75–82. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(82\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0262-5075(82)90011-2)
- Martinie, L., Rossi, P., Roussel, N., 2010. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research* 40, 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.032>
- Mauroux, T., Benboudjema, F., Turcry, P., Aït-Mokhtar, A., Deves, O., 2012. Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. *Cement and Concrete Research* 42, 1014–1023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.04.002>
- Mbemba-Kiele, E.-P., 2010. Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge (phdthesis). Université de Nantes ; Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Messan, A., 2006. Contribution à l'étude du comportement au très jeune âge des structures minces en mortier. 178.
- Meyer, D.M., Combrinck, R., 2022. Utilising microCT scanning technology as a method for testing and analysing plastic shrinkage cracks in concrete. *Construction and Building Materials* 317, 125895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125895>
- Miller, D.P., Moslemi, A.A., 1991. Wood-Cement Composites: Effect of Model Compounds on Hydration Characteristics and Tensile Strength. *Wood and Fiber Science* 472–482.
- Ministère de la Transition écologique, 2020. Construction et performance environnementale du bâtiment [WWW Document]. Ministère de la Transition écologique. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment> (accessed 3.30.22).
- Missemer, L., 2011. Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances : application au BCV (These de doctorat). Grenoble.
- Mohr, B.J., Biernacki, J.J., Kurtis, K.E., 2007. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research* 37, 1531–1543. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.001>
- Mohr, B.J., Nanko, H., Kurtis, K.E., 2005. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites* 27, 435–448. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006>
- Muda, Z.C., Mohd Kamal, N.L., Syamsir, A., Sheng, C.Y., Beddu, S., Mustapha, K.N., Thiruchelvam, S., Usman, F., Alam, M.A., Birima, A.H., Zaroog, O.S., 2016. Impact Resistance Performance of Kenaf Fibre Reinforced Concrete. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 32, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/32/1/012019>

- Mwaikambo, L.Y., 2006. Review of the History Properties and Application of Plant Fibres | Statistics of Plant Fibres | Fibre2fashion.com [WWW Document]. URL <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/3889/review-of-the-history-properties-and-application-of-plant-fibres> (accessed 1.24.22).
- Najimi, M., Farahani, F.M., Pourkhorshidi, A.R., 2009. Effects of polypropylene fibers on physical and mechanical properties of concrete 9.
- Nicolas, R.S., 2011. Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash (phdthesis). Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Nicot, P., 2008. Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier (These de doctorat). Toulouse 3.
- Nomadéis, 2012. Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction [WWW Document]. URL (accessed 11.23.21).
- Olesen et al, 1999. Perspectives on the Performance of Natural Plant Fibres - IENICA ... [WWW Document]. yumpu.com. URL <https://www.yumpu.com/en/document/read/20224191/perspectives-on-the-performance-of-natural-plant-fibres-ienica-> (accessed 11.26.21).
- Orouji, M., Zahrai, S.M., Najaf, E., 2021. Effect of glass powder & polypropylene fibers on compressive and flexural strengths, toughness and ductility of concrete: An environmental approach. Structures 33, 4616–4628. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.048>
- Ozgun, E., Khaled, M., 2010. Effect of Steel Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Normal and High Strength Concretes.
- Page, J., 2017a. Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée (These de doctorat). Normandie.
- Page, J., 2017b. Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée (These de doctorat). Normandie.
- Peled, A., Zaguri, E., Marom, G., 2008. Bonding characteristics of multifilament polymer yarns and cement matrices. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39, 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.03.012>
- Rahimi, M., Hisseine, O.A., Tagnit-Hamou, A., 2022. Effectiveness of treated flax fibers in improving the early age behavior of high-performance concrete. Journal of Building Engineering 45, 103448. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103448>
- Ramakrishna, G., Thirumalai, S., 2005a. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. Cement and Concrete Composites 27, 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008>
- Ramakrishna, G., Thirumalai, S., 2005b. Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study. Cement and Concrete Composites 27, 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>
- Rodrigues, J.P.C., Laím, L., Correia, A.M., 2010. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. Composite Structures 92, 1263–1268. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.029>
- Rong, H., Dong, W., Yuan, W., Zhou, X., 2021. An improved ring test to assess cracking resistance of concrete under restrained shrinkage. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 113, 102976. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102976>
- Roudier, A., 2012. Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin 205.

- Ruano, G., Bellomo, F., López, G., Bertuzzi, A., Nallim, L., Oller, S., 2020. Mechanical behaviour of cementitious composites reinforced with bagasse and hemp fibers. *Construction and Building Materials* 240, 117856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117856>
- Ruiz-Ripoll, L., Barragán, B.E., Moro, S., Turmo, J., 2013. Digital Imaging Methodology for Measuring Early Shrinkage Cracking in Concrete.
- Saad, M., Sabathier, V., Turatsinze, A., 2022. Natural Fibers vs. Synthetic Fibers Reinforcement: Effect on Resistance of Mortars to Impact Loads. Presented at the 4th International Conference on Bio-Based Building Materials, Barcelona, Spain, pp. 95–102. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.95>
- Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites, Metakaolin and Calcined Clays* 23, 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Sadati, S., Khayat, K.H., 2017. Rheological and hardened properties of mortar incorporating high-volume ground glass fiber. *Construction and Building Materials* 152, 978–989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.065>
- Sadiqul Islam, G.M., Gupta, S.D., 2016. Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.05.007>
- Saheb, D.N., Jog, J.P., 1999. Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology* 18, 351–363. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199924\)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X)
- Saidani, M., Saraireh, D., Gerges, M., 2016. Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture. *Engineering Structures* 113, 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.041>
- Sakr, K., EL-Hakim, E., 2005. Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cement and Concrete Research* 35, 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.023>
- Santos, S., Tonoli, G.H.D., Mejia, J., Fiorelli, J., Jr, H., 2015. Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: A review of strategies to improve durability. *Materiales de Construcción* 65. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.05514>
- Savastano, H., Agopyan, V., Nolasco, A.M., Pimentel, L., 1999. Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction and Building Materials* 13, 433–438. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00046-X)
- Savastano, H., Warden, P.G., Coutts, R.S.P., 2005. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. *Cement and Concrete Composites, Natural fibre reinforced cement composites* 27, 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.009>
- Savastano, H., Warden, P.G., Coutts, R.S.P., 2000. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites* 22, 379–384. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00034-2)
- Sayahi, F., Emborg, M., Hedlund, H., Cwirzen, A., 2019. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete, in: *The 1st International Conference on Smart Materials for Sustainable Construction*. Presented at the SMASCO 2019, MDPI, p. 2. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019034002>
- Sedan, D., 2007. Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite (These de doctorat). Limoges.

- Sellami, A., Merzoud, M., Amziane, S., 2013. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. *Construction and Building Materials* 47, 1117–1124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>
- Seng, B., 2018. Etude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de blocs préfabriqués en béton de chanvre (These de doctorat). Toulouse 3.
- Shen, D., Liu, X., Zeng, X., Zhao, X., Jiang, G., 2020. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. *Construction and Building Materials* 244, 117874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>
- Sirajuddin, M., Gettu, R., 2018. Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation. *Mater Struct* 51, 48. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1173-4>
- Souche, J.-C., 2015. Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation (These de doctorat). Montpellier.
- Stanislas, T.T., Tendo, J.F., Teixeira, R.S., Ojo, E.B., Komadja, G.C., Kadivar, M., Junior, H.S., 2021. Effect of cellulose pulp fibres on the physical, mechanical, and thermal performance of extruded earth-based materials. *Journal of Building Engineering* 39, 102259. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102259>
- Stefan, L., 2009. Étude expérimentale et modélisation de l'évolution des propriétés mécaniques au jeune âge dans les matériaux cimentaires (phdthesis). École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- Sultangaliyeva, F., Carré, H., Borderie, C.L., Roussel, N., 2018. Effect of the addition of polypropylene fibers on the rheological behaviour of fresh fluid cementitious materials 9.
- Swift, D.G., Smith, R.B.L., 1979. The flexural strength of cement-based composites using low modulus (sisal) fibres. *Composites* 10, 145–148. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(79\)90288-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(79)90288-X)
- Toledo Filho, R.D., Ghavami, K., Sanjuán, M.A., England, G.L., 2005. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites, Natural fibre reinforced cement composites* 27, 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005>
- Tolêdo Filho, R.D., Scrivener, K., England, G.L., Ghavami, K., 2000. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites* 22, 127–143. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6)
- Toledo Filho, R.D., Silva, F. de A., Fairbairn, E.M.R., Filho, J. de A.M., 2009. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials* 23, 2409–2420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>
- Tran, M.V., Cu, Y.T.H., Le, C.V.H., 2021. Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering* 44, 103400. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103400>
- Tripathi, D., 2002. Practical guide to polypropylene. Rapra Technology Ltd., Shawbury, U.K.
- Turcry, P., 2004. Présentée et soutenue publiquement par : 230.
- Van de Velde, K., Kiekens, P., 2001. Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites. *Composite Structures, Third International Conference on Composite Science and Technology* 54, 355–360. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00110-6)

- Vemuri, N.A., 2008. Effect of New Generations of Concrete on Early-age Shrinkage. University of Dundee.
- Vidil, L., 2019. I - Fibres végétales : renfort de composites 307.
- Vignon, D.M., 2014. Le chanvre et ses applications 19.
- Vignon, M.R., Garcia-Jaldon, C., Dupeyre, D., 1995. Steam explosion of woody hemp chènevotte. *International Journal of Biological Macromolecules* 17, 395–404. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(96\)81852-6](https://doi.org/10.1016/0141-8130(96)81852-6)
- Vinay Kumar Singh, 2014. Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Concrete. IJESRT.
- Wittmann, F.H., 1976. On the action of capillary pressure in fresh concrete. *Cement and Concrete Research* 6, 49–56. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90050-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90050-8)
- World Green Building, 2020. World Green Building Council Annual Report 2020/21 [WWW Document]. World Green Building Council. URL <https://www.worldgbc.org/news-media/world-green-building-council-annual-report-202021> (accessed 3.30.22).
- Wyrzykowski, M., Trtik, P., Münch, B., Weiss, J., Vontobel, P., Lura, P., 2015. Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography. *Cement and Concrete Research* 73, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.013>
- Xiao, J., Falkner, H., 2006. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures. *Fire Safety Journal* 41, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.11.004>
- Yao, Z., Wang, C., Song, N., Jiang, H., 2019. Development of a hybrid biofilm reactor for nitrate removal from surface water with macrophyte residues as carbon substrate. *Ecological Engineering* 128, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.010>
- Zhang, Y., Afroz, S., Nguyen, Q.D., Kim, T., Eisenträger, J., Castel, A., Xu, T., 2021. Analytical model predicting the concrete tensile stress development in the restrained shrinkage ring test. *Construction and Building Materials* 307, 124930. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124930>