

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بiskra
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع:.....

Mémoire en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en :
Génie Civil
Spécialité (Option) :
Modélisation Numérique des Géomateriaux

Contribution à l'étude de la durabilité et les performances des bétons autoplaçants (fibres végétales, milieu agressif, formulation, modélisation)

Présentée par :

Ahmed Abderraouf BELKADI

Soutenue publiquement le : 25 novembre 2018

Devant le jury composé de :

Pr. MELLAS Mekki
Pr. GUETTALA Abdelhamid
Pr. AGGOUN Salima
Dr. MEZGHICHE Bouzidi
Pr. CHABIL Hocine

Professeur
Professeur
Maitre de Conférences
Maitre de Conférences 'A'
Professeur

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Cergy-Pontoise
Université de Biskra
Université de Constantine

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents et mon oncle Saleh et mes tentes (Sihem, Nouna et Leila) et dont le soutien et les encouragements ont permis à ce travail de voir le jour,

Mon frère, ma sœur et ma toute famille pour leur soutien, leur encouragement, leur affection et leur patience,

Tous mes amis.

REMERCIEMENTS

*Ce mémoire de thèse est certes l'aboutissement d'un travail personnel mais c'est surtout le résultat du travail d'un groupe. Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué à sa réalisation bien sur Professeur **AGGOUN Salima**, **Guettala Abdelhamid**, et professeur Houari Hacene en tête de*

liste autant que encadreurs, dirigeants, encouragements et soutien. Je les remercie pour leur confiance, et pour leur aide scientifique et qui par leur expérience et leur compétences m'a transmis leur passion pour la recherche. Je tiens également à leur exprimer toute ma gratitude, pour leurs remarques qui m'ont aidé à avoir un regard extérieur et du recul sur mes travaux, pour leur rigueur scientifique, leurs critiques constructives et leurs conseils avisés, qui m'a transmis leur savoir et m'a aidé à réaliser tous mes objectifs.

Sans leur aide, ce document n'aurait pas vu le jour.

*Je tiens également à remercier Mlle **AMOURI Chahinez**, Docteur au Département de Génie Civil à l'université Mentouri Constantine, pour le partage de ses connaissances, ses expériences et ses nombreux conseils avisés, elle était, et est, la personne sur qui j'ai pu toujours compter. Elle était, et est, vraiment une véritable Sœur pour moi.*

Je voudrais exprimer ma gratitude à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail . . .

*Je suis gré à Monsieur **MELIAS Mekki**, Professeur à l'université Mohamed Khider-BISKRA de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de soutenance.*

*Je tiens à remercier Monsieur **MESGHICHE Bouzidi**, Maitre de conférences 'A' à l'université Mohamed Khider-BISKRA, d'avoir accepté la lourde tâche d'être examinateur de cette thèse et pour ses critiques judicieuses.*

*Je remercie cordialement, Monsieur **CHABIL Hocine**, Professeur de l'université Mentouri-Constantine d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Je remercie toutes les équipes des laboratoires L2MGC (Cergy), LRGC (Biskra) LMDC (Constantine) qui m'ont soutenu à réaliser mes travaux de recherches.

Je remercie tous les membres de l'administration de l'université de Biskra qui m'ont aidé à toutes mes démarches.

*Mes remerciements et ma reconnaissance sont adressés envers **BELKADI SALAH**, Bensalem Sara, lyes **KHOUADJIA**, pour leur soutien et leur aide lors des différentes expérimentations mais aussi pour sa bonne humeur qu'il sait partager généreusement.*

Table des matières

Résumé

Introduction générale

Chapitre 1 Etat de l'art sur les bétons autoplaçants

1.1	Introduction	19
1.2	Les caractéristiques des BAP à l'état frais	19
1.2.1..	Essais d'évaluation de la fluidité des BAP dans les milieux non confinés.....	19
1.2.1.1	Essai d'étalement.....	19
1.2.1.2	Essais V entonnoir	20
1.2.2	Essais d'évaluation de la capacité de remplissage des BAP dans les milieux confinés.....	20
1.2.2.1	Boîte en L	20
1.2.2.2	Essai d'écoulement à l'anneau (j-ring) (EN 12350-12).....	21
1.2.2.3	Stabilité au tamis (NF EN 12350-11).....	21
1.3	Formulation des BAP	22
1.3.1..	Analyse des différentes méthodes de formulation.....	23
1.4	Caractérisation des BAP à l'état durci.....	24
1.4.1	Les performances mécaniques	24
1.4.2	Déformation différée	25
1.4.2.1	Déformation physico-chimique (retrait).....	25
1.4.2.2	Déformation différé d'origine mécanique : le fluage.....	26
1.4.3	La porosité.....	27
1.4.4	Comportement à l'élévation de la température	28
1.4.5	L'attaque sulfatique externe (ASE)	28
1.4.5.1	Mécanismes généraux de la dégradation des bétons attaqués par les sulfates externes	29
1.4.5.2	L'attaque sulfatique externe aux bétons autoplaçants.....	30
1.5	Conclusion.....	30

Chapitre 2 : Effet de différentes natures de fibre sur les propriétés des matériaux cimentaires (béton autoplaçant, mortier)

2.1	Généralité sur les fibres	33
2.1.1	Différents types de fibres utilisés pour le renforcement des bétons	33
2.1.2	Caractéristiques et propriétés des fibres.....	33
2.1.3	Domaines d'application des bétons fibrés.....	33
2.2	Bétons fibrés.....	34
2.2.1	Définition.....	34
2.2.2	Fonctionnement des fibres dans les bétons autoplaçants.....	34

2.2.2.1	Influence des fibres sur les bétons autoplaçants à l'état frais	34
2.2.2.2	Influence des fibres sur le comportement des bétons à l'état durci	36
□	Les performances mécaniques	36
□	Déformation différée (retrait et fluage)	36
2.2.2.3	Durabilité	37
□	Propriétés de transfères	37
□	Comportement sous élévation de la température	38
2.3	Conclusion	38
2.4	Les fibres végétales	39
2.4.1	Introduction	39
2.4.2	Type de fibres végétales	39
2.4.3	Effets des fibres végétales sur le comportement des matériaux cimentaires	41
2.4.4	Durabilité des fibres végétales dans les matériaux cimentaires :	43
2.4.4.1	Modification de la matrice	43
2.4.4.2	Modification au niveau de la fibre	44
2.5	Conclusion	44
<u>Chapitre 3: Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais</u>		
3.1	Introduction	46
3.2	Granulats	46
3.2.1	Analyse granulométrique	46
3.2.2	Coefficient d'aplatissement NF EN 933-3	47
3.2.3	Masse volumique absolue et apparente des granulats	48
3.2.4	Résistance des granulats	49
3.3	Ciment	49
3.4	Additions minérales	49
3.5	Les adjuvants (super plastifiant)	50
3.6	Eau de gâchage	50
3.7	Fibres	50
3.7.1	Propriétés des fibres	50
3.7.1.1	Définition	50
3.7.1.2	Résistance à la traction	52
3.7.1.3	Analyse thermogravimétrique (ATG) des fibres végétales	53
3.7.1.4	Analyse des fibres par infrarouge	54
3.7.1.5	Traitement des fibres	54
3.8	Formulation	55
3.8.1	Formulation des BAP	55
3.8.1.1	Méthode de formulation LCPC (BETONLAB pro)	55

3.8.1.2	La composition retenue.....	56
3.8.2	Formulation des mortiers	57
3.9	Essais de caractérisations.....	57
3.9.1	Essais de caractérisations des BAP	57
3.9.1.1	Caractérisation à l'état frais	57
3.9.1.2	Caractérisation à l'état durci	58
□	Essai de compression.....	58
□	Essai de flexion.....	58
□	Détermination de module de Young (E) (NF EN 1352).....	59
□	Variations dimensionnelle et pondérale	59
□	Fluage	60
□	Comportement vis-à-vis de l'élévation de température.....	61
□	Attaque sulfatique.....	62
□	Porosité capillaire	63
3.9.2	Essais de caractérisation des mortiers	64
3.9.2.1	Préparation des échantillons	64
3.9.2.2	Résistance à la compression et à la flexion	64
3.9.2.3	Perméabilité au gaz (NF EN 18-463).....	65
3.9.2.4	Porosité accessible à l'eau et densité	66
3.9.2.5	La vitesse de l'ultrason:	67
3.9.2.6	Carbonatation	68
3.9.2.7	Cycle gel-dégel (NF P18-425)	68
3.9.2.8	Conductivité thermique.....	69
3.9.2.9	Essai de température	69
3.9.2.10	Microstructure	70
□	Analyse par microscope électronique à balayage (MEB).....	70
□	Analyse thermogravimétrique.....	71
3.10	Conclusion.....	72

Chapitre 4 Les propriétés des BAP avec des fibres végétales à l'état durci

4.1	Performances mécaniques	74
4.1.1	Résistances à la compression et à la flexion.....	74
4.1.2	Module d'élasticité.....	75
4.1.3	Confrontation avec les codes et les modèles	75
4.1.4	Analyse et discussion.....	76
4.1.5	Comportement différé.....	77
4.1.5.1	Retrait endogène	77
4.1.5.2	Retrait total	78

4.1.5.3	Relation entre perte poids et retrait total	80
4.1.5.4	Retrait de séchage	81
4.1.5.5	L'expansion dans l'eau	81
4.1.5.6	Fluage propre.....	82
4.1.5.7	Fluage total	84
4.1.5.8	Coefficient de fluage.....	85
4.1.5.9	Fluage de dessiccation	85
4.1.5.10	Flèche instantanée selon le mode de conservation	86
4.1.5.11	Recouvrance	87
4.1.5.12	Relation entre les caractéristiques mécaniques et le fluage de béton:	89
4.1.6	Conclusion.....	89
4.2	Comportement vis-à-vis de la durabilité	90
4.2.1	Comportement au feu	90
4.2.1.1	Résistance à la compression résiduelle	90
4.2.1.2	Résistance à la flexion résiduelle	92
4.2.1.3	Vitesse d'impulsion.....	92
4.2.1.4	Perte en poids	93
4.2.1.5	Observation visuelle après traitement thermique	94
□	Analyse thermogravimétrie et différentielle thermique.....	95
4.2.1.6	Conclusion	95
4.2.2	Porosité capillaire	96
4.2.3	Attaque sulfatique.....	96
4.2.3.1	Résistance à la compression.....	96
4.2.3.2	Résistance à la flexion	97
4.2.3.3	Variation dimensionnelle et pondérale.....	98
4.2.3.4	Vitesse d'impulsion.....	100
4.3	Conclusion.....	101

**Chapitre 5 Etude des propriétés et la durabilité des mortiers pouzzolanique
contiennent des fibres végétales.**

5.1	Introduction	103
5.2	Performances mécaniques	103
5.2.1	Résistance à la compression.....	103
5.2.2	Résistance à la flexion	104
5.2.3	Capacité de déformation	106
5.3	Propriétés de transfère	106
5.3.1	Conductivité thermique	106
5.3.2	Porosité accessible à l'eau	107

5.3.3	Densité.....	108
5.3.4	Perméabilité à gaz.....	109
5.3.5	Module dynamique	109
5.4	Durabilité des mortiers	110
5.4.1	Carbonatation	110
5.4.1.1	Profondeur de carbonatation	110
5.4.1.2	Evolution de la masse des mortiers carbonatés	111
5.4.1.3	Porosité.....	112
5.4.1.4	Analyse thermogravimétrique.....	113
5.4.1.5	Observation au MEB	115
5.4.1.6	Conclusion.....	117
5.4.2	Cycle gel dégel	118
5.4.2.1	Observation par microscope optique.....	118
5.4.2.2	Performance mécaniques	120
5.4.2.3	Vitesse d'impulsion	121
5.4.2.4	Porosité accessible à l'eau	122
5.4.2.5	Conductivité thermique.....	123
5.4.3	Comportement au feu	123
5.4.3.1	Observation microscope optique après traitement thermique.....	123
5.4.3.2	Performances mécaniques.....	124
	□ Résistance à la compression résiduelle	124
	□ Résistance à la flexion résiduelle	126
	□ Vitesse d'impulsion résiduelle	128
	□ Endommagement	129
	□ Module d'élasticité dynamique.....	130
5.4.3.3	Porosité accessible à l'eau	131
5.4.3.4	Densité.....	131
5.4.3.5	Conductivité thermique.....	132
5.4.3.6	Relation entre la conductivité et différentes caractéristiques	134
5.4.3.7	Analyse thermogravimétrique.....	135
5.4.3.8	Observation par MEB	136
5.5	Conclusion.....	140
	Conclusion générale	142
	Références bibliographiques.....	144

Liste des figures

Figure 1-1 Essai d'étalement.....	19
Figure 1-2 V-funel.....	20
Figure 1-3 Boite en L.....	21
Figure 1-4 Dispositif l'essai de stabilité au tamis.	22
Figure 1-5 La porosité capillaire dans les BAP (Valcuende, Parra et al. 2012).....	28
Figure 1-6 Différentes sources des sulfates (Orejarena and Fall 2010).....	29
Figure 2-1 Effet de la teneur en fibre sur l'étalement des BAP (a) et sur le v-funel (b) (Hamzaoui, Guessasma et al. 2014).....	35
Figure 2-2 Evolution du retrait de séchage de différents bétons fibrés (Corinaldesi and Moriconi 2011).....	37
Figure 2-3 Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines.....	39
Figure 2-4 Fibre de chènevotte (a) et de chanvre (b).....	40
Figure 2-5 Différentes fibres de palmier dattier.....	41
Figure 2-6 Fibre de Dis.....	41
Figure 3-1 Courbe granulométrique des mélanges.....	47
Figure 3-2 Différentes fibres utilisées.....	51
Figure 3-3 Résistance à la traction des différentes fibres végétales utilisées.....	52
Figure 3-4 Analyse thermogravimétrique et sa dérivée sur les fibres végétales (Dis (DS), alfa (AF), palmier dattier(PD) chanvre (CV)).....	53
Figure 3-5 Spectres IFTR les trois fibres (Alfa, Palmier dattier, Diss).....	54
Figure 3-6 Fibre végétales traitées.....	55
Figure 3-7 Organigramme de formulation betonlab pro (De Larrard et Sedran 1999).....	55
Figure 3-8 Interface de Bétonlab pro.....	56
Figure 3-10 Dispositif de flexion.....	59
Figure 3-11 Appareil de module d'élasticité.....	59
Figure 3-12 Mesure de variation dimensionnelle.....	60
Figure 3-13 Dispositif du fluage flexionnel (Chabane and Houari 2008).....	61
Figure 3-14 Four à moufle (1200 C°).....	62
Figure 3-15 Cycle séchage-mouillage avec l'attaque sulfatique.....	62
Figure 3-16 Bacs de conservation dans la solution (Na ₂ SO ₄).....	63
Figure 3-18 Organigramme de plan expérimental.....	64
Figure 3-19 Méthode de malaxage et le mode de conservation.....	65
Figure 3-20 Appareilles de l'essai de compression et de flexion.....	65
Figure 3-21 Essai de la perméabilité à gaz.....	66
Figure 3-22 Valeurs de la perméabilité apparente.....	67
Figure 3-23 Essai de la porosité à l'eau.....	67
Figure 3-24 Essai de l'ultrason.....	68
Figure 3-25 Enceinte de la carbonatation.....	69
Figure 3-26 Chambre climatique.....	69
Figure 3-27 Conductivité thermique.....	70
Figure 3-28 Différents spécimens de mortier dans le four.....	70
Figure 3-29 Cycle réel de l'échauffement.....	71
Figure 3-30 MEB et microscope optique.....	71
Figure 3-31 Appareil de l'analyse thermogravimétrique.....	71
Figure 4-1 Résistance à la compression de différents mélanges (b) Résistance à la flexion.....	74
Figure 4-2 Evolution du module d'élasticité des différents types de BAP.....	75
Figure 4-3 Relation entre les résultats expérimentaux et théoriques du module E.....	76
Figure 4-4 Evolution du retrait endogène en fonction du temps des différents mélanges.....	78

Figure 4-5 (a) la perte en masse (b) Evolution de la déformation du retrait total de différents bétons autoplaçants	79
Figure 4-6 Relation entre la perte en poids et le retrait total	80
Figure 4-7 Evolution du retrait de séchage des différents bétons autoplaçants	81
Figure 4-8 (a) Evolution de l'expansion des différents BAP (b) Gain de masse des différents BAP	82
Figure 4-9 Fluage propre de différents BAP	83
Figure 4-10 Evolution du fluage total des BAP avec et sans fibre	84
Figure 4-11 Evolution du fluage de dessiccation des BAP-F	86
Figure 4-12 Evolution de la flèche instantanée selon le mode de conservation et le type de mélange	87
Figure 4-13 Recouvrance de tous les mélanges pour les deux modes de conservations	88
Figure 4-14 Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température	92
Figure 4-15 Résistance à la flexion résiduelle	93
Figure 4-16 Rapport de la vitesse d'impulsion avant et après cycle de chauffage des BAP-T et BAP-F	94
Figure 4-17 Evolution de la perte en poids des BAPF des différentes températures	94
Figure 4-18 (a) BAP-T et (b) BAP-DS à 600°C	95
Figure 4-19 Analyse thermogravimétrique (a) et sa dérivée sur les spécimens des BAP-PD et des BAP-T chauffées à 150°C (b)	96
Figure 4-20 Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité	97
Figure 4-21 Evolution de la diminution de la résistance à la compression de différents types de béton après 5 cycles	98
Figure 4-22 Evolution de la résistance à la traction par flexion des différents types de béton après 5 cycles de séchage mouillage	99
Figure 4-23 Evolution de la variation dimensionnelle des différents BAP-F pendant les cinq cycles de séchage-mouillage	99
Figure 4-24 Evolution de la perte en poids de différents BAP-F après cinq cycles	100
Figure 4-25 Vitesse d'impulsion de différents mélanges	100
Figure 5-1 Evolution de la résistance à la compression des mortiers	103
Figure 5-2 Observation visuelles après l'essais de compression des différents échantillons effectués	104
Figure 5-3 Evolution de la résistance à la flexion des mortiers	105
Figure 5-4 Courbe contrainte-déformation	106
Figure 5-5 Conductivité thermique des différents mortiers utilisés	107
Figure 5-6 Porosité à l'eau des différents mortiers étudiés	108
Figure 5-7 Densité de différents mélanges	108
Figure 5-8 Perméabilité au gaz des mortiers	109
Figure 5-9 Module dynamique des différents mortiers étudiés (a) vitesse d'impulsion (b)	109
Figure 5-10 Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone dégradée (grise, non colorée)	110
Figure 5-11 Profondeur de carbonatation des différents mélanges	110
Figure 5-12 Evolution de la masse des différents mortiers carbonatés en fonction du temps	111
Figure 5-13 (a) Evolution de la porosité accessible à l'eau des différents mélanges, (b) relation entre la porosité et la profondeur de carbonatation	112
Figure 5-14 Analyse thermogravimétrique des différents mélanges carbonatés et non carbonatés à 28 et 52 jours	113
Figure 5-15 Analyse au MEB des échantillons non carbonatés et carbonatés à 52 jours	117
Figure 5-16 Observation microscopie optique des différents mortiers subis des cycles gèle-dégel	119
Figure 5-17 (a) résistance à la flexion (b) résistance à la compression des différents mortiers étudiés	120
Figure 5-18 Capacité de déformation des différents mortiers avant et après 60 cycles	120
Figure 5-19 Aspect visuel du mécanisme de la rupture des MOF	121

Figure 5-20 Evolution de la vitesse d'impulsion des différents mélanges étudiés.....	122
Figure 5-21 (a) Evolution de la porosité des différents mélanges étudiés. (b) la densité des MF.....	122
Figure 5-22 Evolution de la conductivité thermique des mortiers après et avant les cycles gèle dégel.	123
Figure 5-23 Observation par microscopie optique des différents mélanges soumis à 600°C.....	124
Figure 5-24 Evolution de la résistance en compression des mortiers en fonction de la température..	125
Figure 5-25 Résistance à la flexion résiduelle.	127
Figure 5-26 (a) le rapport de la vitesse d'impulsion avant et après les cycles de chauffage des MT et MF. (b) relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression.....	128
Figure 5-27 Evolution de l'endommagement suivant la température.....	130
Figure 5-28 le rapport du module dynamique après et avant exposition de la température.	131
Figure 5-29 (a) Evolution de la porosité suivant la température. (b) Relation entre la porosité et la température.....	131
Figure 5-30 Évolution de la densité suivant la température.	132
Figure 5-31 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température.	133
Figure 5-32 (a) Relation entre la conductivité thermique et la porosité. (b) Relation entre Q et la résistance à la compression.....	134
Figure 5-33 Analyse thermogravimétrique de différents mélanges de 20 à 600°C.....	135
Figure 5-34 Observation au MEB des différents mélanges de MO à des température de 20, 450 et 600°C.	140

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9	20
Tableau 1-2 Valeurs pour justifier la capacité de passage des BAP selon l'essai de Jirring.....	21
Tableau 1-3 Quelques recommandations pour formuler un BAP.....	23
Tableau 1-4 Exemple de différentes compositions de BAP.....	27
Tableau 2-1 Effet du taux et des caractéristiques des fibres sur les propriétés à l'état frais des BAP...	34
Tableau 3-1 Coefficient d'aplatissement	48
Tableau 3-2 Valeurs des masses volumiques des granulats utilisés.....	48
Tableau 3-3 Valeurs de bleu méthylène et de l'équivalent de sable des granulats.....	49
Tableau 3-4 Caractéristiques mécaniques des gravillons 8/15.....	49
Tableau 3-5 Caractéristiques chimiques et physique des ciments utilisés.....	49
Tableau 3-6 Composition chimique et physique de fillers calcaire et du metakaolin.....	50
Tableau 3-7 Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des fibres végétales et polypropylène.....	52
Tableau 3-8 Composition de différents mélanges de BAP utilisés.....	56
Tableau 3-9 Composition des différents mélanges de mortiers utilisés.....	57
Tableau 3-10 Caractéristiques à l'état frais des bétons autoplaçants.....	57
Tableau 4-1 Différentes équations reliant le module E et la résistance à la traction (Vilanova, Fernandez-Gomez et al. 2011).....	76
Tableau 4-2 Rapport entre le retrait des bétons avec fibres et le béton témoin.....	79
Tableau 4-3 Coefficient de fluage des différents BAP.....	85
Tableau 4-4 Valeurs de la flèche instantanée et la recouvrance de différents mélanges.....	88
Tableau 4-5 Module d'élasticité et la résistance à la flexion à 7 jours des différents bétons.....	89
Tableau 4-6 Valeurs relatives au fluage de tous les bétons autoplaçants fibrés après 200 jours de charge, la résistance à la flexion et le module élastique.....	89
Tableau 5-1 Les pertes de masse des échantillons carbonatés et non carbonatés aux températures 130 et 800°C.....	113
Tableau 5-2 Ouvertures des fissures superficielles des différents mortiers soumis à 600°C.....	123
Tableau 5-3 Différentes relation entre les différents paramètres étudiés.....	133

LISTE DES ABREVIATIONS

MEB : Microscope électronique à balayage

$\emptyset_{(t,\tau)}$: Coefficient de fluage

$\varepsilon_{(t,\tau)}$: Déformation de fluage à l'instant t d'une éprouvette chargée à l'instant τ

$\varepsilon_{(\tau)}$: Déformation instantanée mesurée à l'instant τ

V_p : Vitesse d'impulsion

D_V^T : Coefficient d'endommagement,

ρ^T : Densité absolue

V^T : Vitesse d'impulsion à une température donnée

ρ^{20} : Densité absolue

V^{20} : Vitesse d'impulsion à 20°C.

μ : Viscosité dynamique du diazote N2 [Pa.s],

Q : Débit volumique du gaz à la sortie [m³/s],

P_{atm} : Pression atmosphérique [Pa],

l : Epaisseur du corps d'épreuve en [m],

A : Section de l'échantillon en [m²],

P_1 : Pression absolue de gaz à l'entrée en [Pa].

n : Nombre de classes dans le mélange

y_j : Proportion de classe j dans le mélange

a_{ij} : Effet de desserrement exercé par un grain fin j sur un empilement de gros grains i

b_{ij} : Effet de paroi exercé par un gros grain i sur un empilement de grains fins j

K : Indice de serrage qui dépend du protocole de compactage

Φ : Compacité réelle du mélange de n classes

k_w : Coefficient traduisant la forme des granulats

SP : dosage de superplastifiant

SP* : dosage de saturation

Résumé

Ces dernières années ont vu un regain d'intérêt pour, des fibres végétales. En effet, ces fibres peuvent représenter une alternative aux fibres traditionnelles utilisées dans les matériaux de construction, telles que les fibres polypropylènes. Le développement durable exige des matériaux respectueux de l'environnement donc des matériaux naturels. En ce sens, les fibres végétales utilisées comme renfort pour les matériaux cimentaires constituent une option très intéressante pour l'industrie de la construction.

Ainsi, notre travail de recherche se compose de deux parties. La première partie concerne l'étude de l'influence de la nature des fibres sur les caractéristiques à court et à long terme du béton autoplaçant. La seconde partie est dédiée à une approfondie sur l'effet des fibres végétales sur les mortiers à base de metakaolin.

Dans la première partie sept mélanges de béton autoplaçant ont été confectionnés à base de 6 types de fibre de nature différente (chanvre, chènevotte, Palmier dattier, Alfa, Dis et polypropylène); les bétons sont testés à différents essais expérimentaux (Résistance à la compression, à la flexion, retrait, fluage, comportement au feu et attaque sulfatique).

Dans la deuxième partie six mélanges de mortier à base de metakaolin ont été effectués avec les mêmes fibres précédentes sauf le chènevotte. Ces fibres ont été préalablement traitées avec de l'hydroxyde de calcium. Le comportement des mortiers à base de ces différentes fibres a été étudié vis-à-vis de plusieurs phénomènes : conductivité thermique, carbonatation, cycle gèle-dégel et comportement à l'élévation de la température. Une analyse microstructurale a été réalisée pour mieux comprendre ces phénomènes.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des fibres végétales comme renfort écologique dans les BAP présente des caractéristiques à l'état frais et à l'état durci comparable à celles d'un BAP témoin sans fibres. Dans cette étude on confirme que la réalisation des BAP avec fibres végétales est possible. Néanmoins, ces fibres doivent être préalablement traitées pour un meilleur comportement, notamment vis-à-vis de la durabilité.

Mots clés : fibres végétale, fibre polypropylène, béton autoplaçants fibrés, mortier pouzzolanique, durabilité.

Abstract

In recent years, there has been a renewed interest in the vegetable fibers. Indeed, these fibers represent an interesting alternative to traditional fibers used in building materials, such as the polypropylene fibers. Sustainable development requires environment-friendly materials, so natural materials. In that sense, vegetable fibers reinforced the cementitious materials provide a very interesting option for the construction industry.

Our research is divided into two parts. The first part concerns the study of the effect nature fibers in self-compacting concrete on the short and long term behavior. The second part is devoted to an in-depth study of the effect of vegetable fibers on metakaolin-based mortars.

In the first part, seven mixtures of self-compacting concrete were made from six types of fibers of different types (hemp, hurds, date palm, Alfa, Dis and polypropylene); concretes are tested in different experimental tests (compressive strength, bending strength, shrinkage, creep, fire behavior and sulfate attack).

In the second part, six mortar mixtures with metakaolin were made with the same previous fibers except the hurds . These fibers were previously treated with calcium hydroxide. The behavior of the mortars based on these different fibers has been studied with regard to several phenomena: thermal conductivity, carbonation, freeze-thaw cycle and temperature rise behavior. A microstructural analysis was carried out to better understand these phenomena.

The results obtained show that the incorporation of vegetable fibers as ecological reinforcement in BAPs present a characteristics in the both of fresh and hardened state comparable to those of a control BAP without fibers. In this study it is confirmed that the realization of BAP with vegetable fibers is possible. Nevertheless, these fibers must be previously treated for better behavior, especially with regard to durability.

Keyword vegetable fiber, polypropylene fiber, self-compacting concrete with fiber, pozzolanic mortar, durability.

ملخص

شهدت السنوات الأخيرة اهتمامًا متجددًا بالألياف النباتية. في الواقع ، قد تمثل هذه الألياف بديلاً عن الألياف التقليدية المستخدمة في مواد البناء ، مثل ألياف البوليبيروبيلين. تتطلب التنمية المستدامة للمواد الخضوع للمقاييس العالمية للبيئة. وفي هذا المجال ، يعتبر استعمال الألياف النباتية كقوى دعامية للمواد الإسمنتية خيارًا مثيرًا للاهتمام من أجل بناء البنايات. وهكذا، يتكون عملنا البحثي من جزأين. يتعلق الجزء الأول بدراسة تأثير طبيعة الألياف على الخصائص القصيرة والطويلة المدى للخرسانة ذاتية الرص. الجزء الثاني مخصص لدراسة متعمقة حول تأثير الألياف النباتية على الملاط الذي يحتوي على المطكولة .

في الجزء الأول ، تم إنتاج سبعة خرسانات ذاتية الانضغاط تحتوي على ستة أنواع من الألياف (القنب، القنب الحويصة، نخيل التمر، حلفاء، الديس، والبوليبيروبيلين) ؛ يتم اختبار الخرسانة في عدة تجارب مختلفة (مقاومة للضغط، والانحناء، الانكماش، وسلوك تحت تأثير الحريق ، وتأثير الكبريتات).

في الجزء الثاني، تم صنع ستة خلطات من الملاط المحتوى على المطكولة و المدعمة بنفس الألياف السابقة باستثناء القنب الحويصة. مع العلم ان هذه الألياف معالجة مسبقاً باستخدام هيدروكسيد الكالسيوم. تمت دراسة سلوك هذه الملاط المدعمة بالألياف تحت تأثير العديد من الظواهر منها : انتقال الحرارية، الكربنة، دورة ذوبان و التجمد، وسلوك في حالة ارتفاع درجات الحرارة.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن دمج الألياف النباتية كدعم إيكولوجي في BAP تثمر خصائص مماثلة لل BAP بدون ألياف. تم التأكيد في هذه الدراسة على أن انشاء BAP باستخدام الألياف النباتية أمر ممكن. ومع ذلك، يجب معالجة هذه الألياف من قبل لتحسين سلوكها، خاصة فيما يتعلق باستخدام المواد.

الكلمات المفتاحية: الألياف النباتية ، ألياف البوليبيروبيلين ، الخرسانة ذاتية الرص مدعمة بالألياف ، الملاط البوزولاني ، الاستدامة.

INTRODUCTION GENERALE

En générale, l'introduction de fibres, quelle soient métalliques ou synthétiques dans les matériaux cimentaires améliorent leurs performances : limitation des propagations des fissures, amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction, à la flexion) et amélioration de la ténacité du béton durci. Néanmoins le prix de revient de ces fibres est élevée et leur fabrication dégage du CO₂ et utilise des ressources non renouvelables. Ainsi, les recherches actuelles s'orientent vers, la possibilité de les remplacer par des fibres naturelles. Les fibres végétales sont biodégradables et renouvelables. Elles peuvent être issues de la valorisation d'une ressource locale dans certains pays. Ainsi les fibres végétales peuvent permettre d'atteindre des propriétés mécaniques intéressantes, tout en réduisant de façon significative le coût de revient du composite cimentaire.

De plus, le développement durable exige des matériaux respectueux de l'environnement donc des matériaux naturels. En ce sens, les fibres végétales utilisées comme renfort pour les matériaux cimentaires constituent une option très intéressante pour l'industrie de la construction.

L'Algérie est riche en plantes telles que l'Alfa, le Dis, les palmiers dattier, etc... largement utilisées dans le domaine de construction (les maisons...etc).

La revue de littérature montre qu'il y'a peu d'étude sur l'incorporation des fibres végétales dans les bétons autoplaçants et les mortiers cimentaires. Les quelques études réalisées portent seulement sur la caractérisation classique à l'état frais et durci. Par contre des études portent sur le comportement à long terme et le comportement vis-à-vis de la durabilité (notamment la tenue aux cycles gel/dégel et le comportement au feu...etc) restent limitées. Suivant la nature des fibres végétales, les réponses du béton autoplaçant en termes de déformations à long terme et de comportement à élévation de la température peuvent être très différentes car ces fibres engendrent des porosités supplémentaires plus importantes que celle de béton témoin sans fibre.

Dans le cadre de cette étude, cinq fibres végétales de nature différente ont été utilisées (Alfa, Palmier dattier, Dis, chanvre et chènevotte) en remplacement des fibres de polypropylène.

L'approche est essentiellement expérimentale et comporte deux axes principaux :

Le premier axe concerne l'étude de la faisabilité de l'introduction des fibres végétales dans la fabrication des bétons autoplaçants. L'objectif ici est de valoriser leur utilisation et d'étudier leur influence sur les propriétés à l'état frais et durci du composite.

Le deuxième axe concerne l'influence de la présence des fibres végétales sur le comportement et à la durabilité des mortiers à base de métakaolin (élévation de la température, carbonatation, cycle gèle dégel).

Ainsi, le mémoire de thèse se compose de deux grandes parties.

La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en deux chapitres :

- Le premier est consacré à des généralités sur les bétons autoplacants, suivi de leur comportement vis-à-vis de différents phénomènes (retrait, fluage, feu et attaque sulfatique).
- Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur la nature des fibres utilisées et leur influence sur le béton autoplacant et les mortiers cimentaires à l'état frais, durcissant et durci.

La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit :

- Une description détaillée de tous les matériaux utilisés et regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le troisième chapitre
- Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fibres végétales sur les comportements et la durabilité des bétons autoplacants : retrait, fluage, feu et attaque sulfatique.
- Le dernier chapitre présente l'étude des performances et la durabilité des mortiers à base de metakaolin.

Chapitre 1

Etat de l'art sur les bétons autoplaçants

1.1 Introduction

Dans les années quatre-vingt, des études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculant et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines a conduit aux gains de résistance et à l'amélioration de la durabilité. De plus, l'ouvrabilité de ces bétons a été également développée quasiment maîtrisée.

Aujourd'hui, la plus part des recherches sont orientées vers un autre type de béton constituant une véritable révolution dans le domaine des bâtiments et travaux publics : c'est le béton autoplaçant.

Le béton autoplaçant (BAP) est un nouveau béton qui intéresse beaucoup l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Ceci est dû aux nombreux avantages qu'il présente : un écoulement sous son propre poids et sans aucune vibration même dans les milieux à forte densité de ferrailage. Ainsi, le BAP est utilisé dans de nombreux pays pour diverses applications et configurations structurales. Dans les paragraphes suivants on décrira les principales caractéristiques de ce type de béton à l'état frais, à l'état durci et vis à vis de la durabilité.

1.2 Les caractéristiques des BAP à l'état frais

1.2.1 Essais d'évaluation de la fluidité des BAP dans les milieux non confinés

1.2.1.1 Essai d'étalement

L'essai d'étalement est largement utilisé, car il est facile à mettre en œuvre. L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité de déformation des bétons sous leur propre poids. Si le diamètre est grand, le béton est fluide tout en gardant sa stabilisation (aucune ségrégation). Benaïssa et al (Ayed, Benaïssa et al. 2010) ont donné certaines observations complémentaires sur cet essai:

- ✓ Les bords de la galette donnent une indication sur le ressuage;
- ✓ Le traçage à la truelle des lignes sur la galette, nous permet d'observer la manière de l'écoulement des BAP ;
- ✓ La forme plus ou moins bombée de la galette indique l'homogénéité ou non du BAP.

Ainsi, on considère l'essai de l'étalement comme un test de base pour contrôler la qualité des BAP.

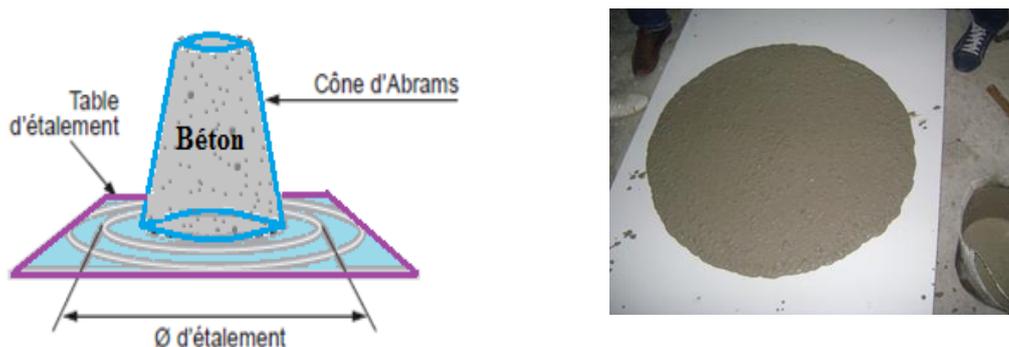


Figure 1-1 Essai d'étalement

(Domone 2007) a montré que parmi les 60 travaux sur les BAP qu'il a analysés, 90% présentaient un étalement d'un diamètre de 600 à 750 mm environ.

1.2.1.2 Essais V entonnoir

L'essai de V-entonnoir est réalisé en mesurant le temps que met le béton à s'évaluer à travers l'entonnoir sous son propre poids.

Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. Un temps élevé peut indiquer une faible capacité de remplissage du BAP. Ainsi, ce temps est lié à la viscosité plastique du mélange.

La norme donne les classes de viscosité apparente en fonction du temps d'écoulement au V-funnel.

Tableau 1-1 Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9.

Classe	Temps (seconde) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en v
VF1	<9,0
VF2	9,0 à 25,0



Figure 1-2 V-funnel

1.2.2 Essais d'évaluation de la capacité de remplissage des BAP dans les milieux confinés

1.2.2.1 Boîte en L

Le principal avantage des BAP est de pouvoir remplir des éléments structuraux très ferrailés. Pour cela l'essai à la boîte en L est considéré dans de nombreux pays comme un critère d'acceptance des bétons autoplaçants. L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité de passage des bétons autoplaçants dans un milieu confiné. Le béton doit s'écouler à travers des renforts sans aucune ségrégation ou blocage. Le rapport des hauteurs du béton aux deux extrémités de la boîte est appelé le rapport de blocage $BR=H_2/H_1$ (figure 1-3). Si le BAP a des bonnes propriétés à l'état frais, le rapport de blocage est égal à 1. Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage (rapport H_2/H_1) de la boîte en L doit être supérieur à 0,8 (NF EN 12350-10).

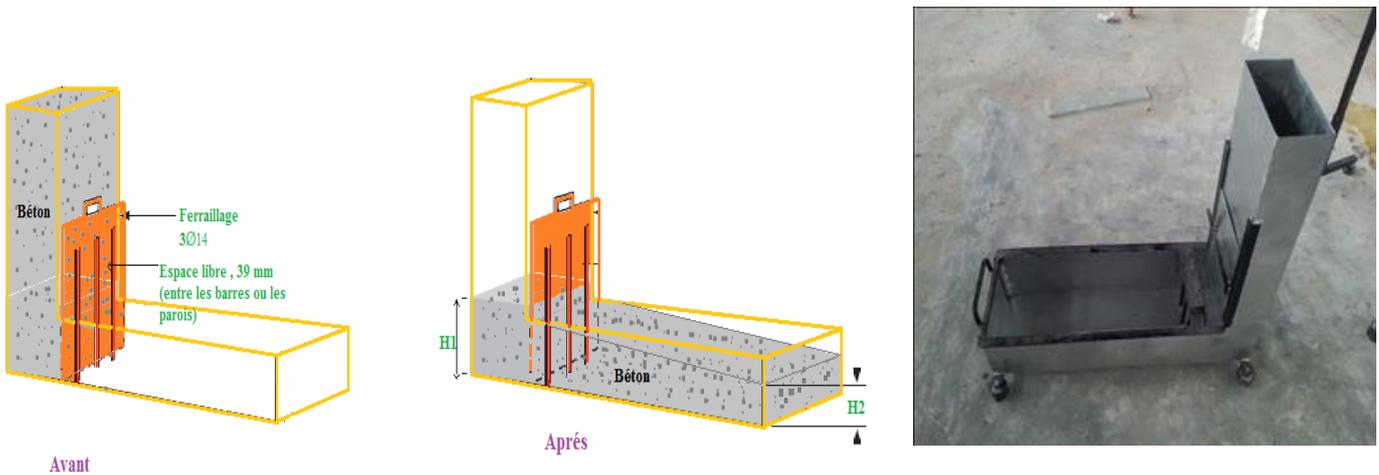


Figure 1-3 Boite en L

1.2.2.2 Essai d'écoulement à l'anneau (j-ring) (EN 12350-12)

L'essai d'écoulement à l'anneau est un essai de caractérisation de l'étalement du BAP dans un milieu confiné. Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié.

L'appareil se décompose d'un anneau avec 16 ou 18 tiges d'armature verticales en HA de diamètre de 16 mm espacées de 5 cm. On mesure à la fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Ainsi on mesure les hauteurs au centre (h_{int}) et à l'extérieur (h_{ext}) de l'anneau.

Tableau 1-2 Valeurs pour justifier la capacité de passage des BAP selon l'essai de Jirring.

Classe	Palier de l'étalement à l'anneau (mm) (valeurs limites applicables aux charges individuelles)
Pj1	≤ 10 avec 12 armatures
Pj2	≤ 10 avec 16 armatures

1.2.2.3 Stabilité au tamis (NF EN 12350-11)

L'essai de stabilité au tamis est un essai développé afin d'évaluer le potentiel de la ségrégation statique. Le principe de cet essai est de mesurer la quantité de passage de laitance à travers les mailles du tamis de 5 mm. Cet essai peut être utilisé durant la formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour contrôler la stabilité du béton livré sur chantier.

$$\text{Le pourcentage de la laitance} = \frac{\text{la masse de laitance}}{\text{la masse de l'échantillon}} * 100\% = \Pi$$

Le critère de la stabilité des BAP:

- ✓ $0 \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- ✓ $15 < \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique.
- ✓ $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.



Figure 1-4 Dispositif l'essai de stabilité au tamis.

1.3 Formulation des BAP

Pour assurer les propriétés principales des bétons autoplaçants : la fluidité, la capacité de déformation, l'homogénéité et la stabilité il faut déterminer soigneusement les proportions des matériaux constitutifs du mélange. La méthode de formulation ou de la composition des BAP est particulière et peut dépendre de la disponibilité des matières premières locales. Le volume de pâte des BAP est plus élevé que celui à des bétons ordinaires (BOV). Le dosage de superplastifiant est 2 à 3 fois plus élevé pour les BAP que pour les bétons ordinaires. Ainsi la mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe que le BOV. La plus part des formateurs se sont basé sur l'amélioration de la compacité des constituants anhydres du béton.

A l'origine le BAP a été découvert au Japon. Les chercheurs Okamura et al (Okamura 1997) ont mis en place ce béton pour le besoin d'accélérer la cadence des chantiers. Ils ont beaucoup travaillé pour obtenir un béton stable, fluide ayant une grande capacité de remplissage dans les milieux très ferraillés. Okamura et al (Okamura 1997) ont proposé une méthode de formulation dite la méthode japonaise. Cette dernière est basée sur des essais préliminaires sur des mortiers et des pâtes cimentaire. Ces essais permettent d'obtenir un dosage optimal de superplastifiant et d'eau. Après cette proposition Japonaise plusieurs chercheurs ont mis en place d'autres méthodes de conception de ce béton. Ces méthodes de formulations sont divisées en cinq catégories : les méthodes empiriques; les méthodes basées sur la résistance à la compression; les méthodes basées sur la compacité des granulats, les méthodes basées sur le modèle factoriel statistique et les méthodes basées sur la rhéologie des pâtes. Le tableau suivant regroupe les principales recommandations et formulations des bétons autoplaçants existant dans la littérature:

Tableau 1-3 Quelques recommandations pour formuler un BAP.

Classification	Auteurs	Année	Caractéristiques principales	Référence
Méthode de conception empirique	(Okamura and Ozawa 1994)	1995	Fixer la teneur des gros et fins granulats, puis d'obtenir la matrice fluide autoplaçante en ajustant E/L et le dosage de superplastifiant.	(Okamura and Ozawa 1994)
	Edamatsa, Sugamata et Ouchi flux	2003	Utilisation des mortiers et l'essai de V-entonnoir pour sélectionner le volume de granulats fins, le dosage de superplastifiant et de l'eau.	(SUGAMATA A and OUCHI 2003)
	Domone	2009	Pour un ensemble donné de propriétés requises, faire la meilleure estimation des proportions de mélange, puis effectuer procès mêle à prouver	(Domone 2009)
	Khaleel et Razak	2014	Basée sur trois phases, à savoir la pâte, mortier et béton.	(Khaleel and Razak 2014)
Méthode de résistance à la compression	Ghazi, et Al Jadiri	2010	Basée sur la méthode ACI 211.1 pour proportionner les bétons classiques et la méthode EFNARC pour proportionner les BAP.	(Kheder and Al Jadiri 2010)
	Dinakar, Sethy, Sahoo	2013	utilisation le laitier dans le BAP basant sur les exigences de résistance.	(Dinakar, Sethy et al. 2013)
Méthode basée sur la compacité des granulats.	Hwang, et Tsai	2005	utilisation un Mélange densifié par la conception Algorithme (DMDA), dérivée de la théorie de la densité maximale et la théorie de l'excès de pate.	(Hwang and Tsai 2005)
	Petersson, Billberg,	1996	Conduite principalement sur la base de la teneur en vides et les critères de blocage	(Petersson, Billberg et al. 1996)
	Su, Hsu, et Chai	2001	Utilisation facteur de compacité (PF) pour contrôler le contenu de l'agrégat fin et grossier dans le mélange.	(Su, Hsu et al. 2001)
	Sedran, et De Larrard	1996	Logiciel utilisé pour concevoir les BAP basant sur le modèle d'optimisation du squelette granulaire.	(Hu, de Larrard et al. 1996)
	Shi, et Yang	2005	Utiliser une combinaison de la théorie de la pâte excessive et directives de l'ACI à conçoivent bétons légers auto-plaçant	(Shi and Yang 2005)
	Sebaibi, Benzerzour, Sebaibi et Abriak	2013	Baser sur la norme EN 206-1, le mode de compactage (CPM) et le facteur de compacité (PF).	(Sebaibi, Benzerzour et al. 2013)
	Kanadasan et Razak	2014	Cette méthode basée sur la compacité de particules pour obtenir la conception du mélange final.	(Kanadasan and Razak 2014)
Modèle factoriel statistique	Khayat, Ghezal, et Hadriche	1999	Obtenir une relation statistique entre cinq paramètres de mélange et les propriétés du béton.	(Khayat, Ghezal et al. 1999)
	Ozbay, Oztas, Baykasoglu, Ozbebek	2009	Conception dans un réseau orthogonal L18 avec six facteurs, à savoir, le rapport E / C, la teneur en eau (W), le granulats fin et grossier (S / A), la teneur en cendres volante (FA), la teneur d'agent d'entraîneur d'air (AE) et le dosage du superplastifiant (SP).	(Ozbay, Oztas et al. 2009)
	Bouziani	2013	Utile pour évaluer l'effet de trois types de sable (sable de rivière, sable concassé et sable dunes) sur les propriétés frais et durcis de BAP.	(Bouziani, Bédérina et al. 2014)
Rhéologie des modèles de pâte	Saak, Jennings, et Shah	2001	Utile pour éviter la ségrégation des granulats (un paramètre critique de la conception).	(Saak, Jennings et al. 2001)
	Bui, Akkaya, et Shah	2002	Développer les concepts de Saak pour inclure les effets du rapport des granulats, la distribution granulométrique des granulats grossiers et fins, afin de proposer un nouveau modèle de la rhéologie de la pâte.	(Van Bui 2002)
	Ferrara, Park, et Shah	2007	Formuler les bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques basant le modèle rhéologie de la pâte.	(Ferrara, Park et al. 2007)

1.3.1 Analyse des différentes méthodes de formulation

1. La méthode de conception empirique est facile à d'utilisation. Cependant, elle exige beaucoup d'essais expérimentaux sur les matières premières afin d'obtenir les proportions de mélanges satisfaisantes.

2. La méthode basée sur la résistance à la compression présente une procédure claire et précise pour obtenir les quantités spécifiques des ingrédients. Ainsi, elle permet de réduire le nombre d'essais préliminaires pour la détermination des mélanges. Néanmoins, la nature des fillers et les gros granulats sont pris en considération.
3. La méthode basée sur la compacité des granulats tient compte essentiellement les relations entre la pâte et les granulats. Cette formulation simple nécessite une quantité minimale de liant.
4. La méthode basée sur le modèle factoriel statistique permet de diminuer les essais nécessaires pour l'optimisation des mélanges. Toutefois, les modèles statistiques doivent être obtenus à partir de beaucoup d'essais de laboratoire sur les matières premières.
5. La méthode basée sur les modèles rhéologiques de pâte peut réduire le travail et les matériaux utilisés en laboratoire. Ainsi elle fournit une base scientifique pour contrôler la qualité de nouveaux minéraux et des adjuvants.

En conclusion la conception d'un mélange est une étape cruciale pour obtenir un BAP de bonne qualité. Une bonne formulation de BAP devrait prendre en compte : (1) le type d'application; (2) la robustesse des matières premières; (3) les exigences techniques ; (4) la durabilité et (5) le coût.

1.4 Caractérisation des BAP à l'état durci

Le béton autoplaçant (BAP) a été introduit dans l'industrie de la construction à partir des années 1990 (Domone 2007). Plusieurs recherches ont été consacrées à l'étude et l'évaluation des nouvelles propriétés de ces bétons. Les propriétés des BAP à l'état durci ont beaucoup d'importance pour les formulateurs de béton et les concepteurs structuraux. La résistance à la compression et d'autres caractéristiques sont régulièrement vérifiées pendant les études de formulation. Les autres propriétés, telles que : le module d'élasticité, le fluage, le retrait et la durabilité, ont souvent fait l'objet d'investigations plus spécifiques. Il y a eu six grandes conférences internationales dans les 7 dernières années consacrées particulièrement aux BAP. Ainsi, une base de données considérable a été développée sur les propriétés à l'état durci des bétons autoplaçants. Dans ce qui suit, nous décrivons les propriétés principales des BAP à l'état durci à se basant sur ces dernières données de la littérature.

1.4.1 Les performances mécaniques

Les performances mécaniques : la résistance en compression, en traction et le module d'élasticité dépendent de la composition et le mode de la cure du béton. On générale les BAP montrent des résistances mécaniques quasiment similaires aux bétons ordinaires (BOV). Selon (Topçu and Uygunoğlu 2010) qui ont étudié l'effet de la géométrie des éprouvettes (cubes et cylindres), le type de granulats (concassés ou roulés) et le rapport E / C sur la résistance mécanique des BAP, celle-ci est influencée beaucoup plus par le rapport E/L . (Domone 2007) a fait une analyse documentée sur une vaste revue bibliographique. Il a trouvé que le module d'élasticité du BAP était inférieur de 40% à celui de béton ordinaire (BOV). D'autre part et d'une manière générale, la résistance à la traction par flexion évolue pour les BAP, de la même façon que pour les BOV. (Almeida Filho, Barragán et al. 2010) ont réalisé une étude expérimentale sur trois composition différentes de BAP. Leur résultats montrent que le module d'élasticité, la résistance à la compression et à la traction sont plus faible que

ceux des BOV d'environ 3.6%, 5.7% et 14.4% respectivement. Par contre selon les (Viacava, de Cea et al. 2012) que la plupart des études publiées montrent que les BAP présentent des résistances à la compression plus élevées que celles des BOV. (Valcuende, Parra et al. 2012) ont analysé 138 références publiées entre 1997 et 2008. Ils ont trouvé que la résistance à la compression pour différentes compositions de BAP est comprise entre 50 et 60 MPa. (Felekoglu 2007) (Zhu and Gibbs 2005) (Bosiljkov 2003) ont trouvé que la résistance à la compression et à la traction sembleraient beaucoup influencées par la présence des fillers dans le BAP. Ceci a été également confirmé par les travaux de (BOUKNI and HOUARI 2010). Les résultats provenant de plus de 70 études récentes sur les propriétés mécaniques des BAP ont été analysés et comparés à ceux des bétons vibrés (BOV). (Domone 2007) révèlent que l'adhérence entre l'acier et le BAP dans les éléments précontraints est similaire ou supérieur à celle du béton vibré.

1.4.2 Déformation différée

Les déformations différées des bétons, qu'elles que soient leur d'origine : physico-chimique comme le retrait d'hydratation et de dessiccation ou mécanique comme le fluage sous contrainte, peuvent mettre en cause la durabilité des ouvrages. Les déformations de retrait peuvent induire des risques de fissuration et ainsi créer les conditions d'une propagation d'éléments favorisant la corrosion des armatures. Les déformations de fluage peuvent entraîner, dans le cas des structures isostatiques, des déformations différées, notamment des flèches, incompatibles avec le bon fonctionnement en service des ouvrages. Dans le cas de structures précontraintes ces déformations génèrent des chutes importantes de la tension des câbles. Dans le paragraphe suivant nous parlerons de quelques travaux réalisés sur les phénomènes différés des BAP.

1.4.2.1 Déformation physico-chimique (retrait)

Le retrait est qualifié d'endogène en l'absence d'échange hydrique (sans perte de masse) avec le milieu extérieur (c'est le cas du comportement au cœur d'une structure massive en béton). On parlera de retrait de séchage lorsqu' il y a déséquilibre hydrique entre l'intérieur du béton durci dont l'hygrométrie de départ est de l'ordre de 75% à 100% selon le rapport eau sur ciment E/C et celle du milieu ambiant (dans ce cas, il y a alors une perte de masse).

Le retrait de dessiccation est lié à la différence d'hygrométrie entre le cœur du béton et l'ambiance extérieur. Il y a apparition d'un fort gradient hydrique qui tend à créer des déformations de retrait différentiels incompatible entre elles.

Les BAP sont généralement considérés comme un type spécial de béton contenant des quantités élevées de fines et ayant des rapports eau / liant plus faible par rapport au béton ordinaire (Fares, Noumowe et al. 2009, Sideris and Manita 2013, Bensalem, Amouri et al. 2014) (Belaidi, Kenai et al. 2016). Ainsi, la porosité du BAP est généralement réduite et ce composite se caractérise par une perméabilité faible à la diffusion des fluides (Ye, Liu et al. 2007) (Bangi and Horiguchi 2012). Ce fait est responsable du comportement vis à vis de la durabilité des BAP. Les bétons autoplaçants utilisés de nos jours contiennent environ $80 \text{ l} / \text{m}^3$ de plus en volume de pâte que les bétons ordinaires (BOV). Par conséquent, il existe des différences sur les propriétés du matériau durci, par exemple le retrait qui peut être plus élevé que le BOV (Loser and Leemann 2009) (Bissonnette, Pierre et al. 1999) (Al-Saleh and Al-

Zaid 2006) (Neville 1996). Ainsi selon le modèle de (Hanasaki, Inuzuka et al. 2010) le retrait ultime des BAP devrait être 20% plus élevé que dans un béton classique. Cette information a également rapportée par de nombreux chercheurs en particulièrement pour le retrait de séchage (Bensalem, Amouri et al. 2014) (Neville 1996) (Benkechkache, Chabane et al. 2010) (Siad 2010). On en conclut que le béton autoplaçant a des réponses particulières vis à vis du retrait. S. Bensebti (Bensebti, Houari et al. 2008) ont mentionné que l'augmentation du taux de substitution du ciment par des fillers calcaires dans les compositions des BAP permet de réduire le retrait total dans les milieux ambiants et couverts (BOUKNI and HOUARI 2010) (Benkechkache and Houari 2011). Donc le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquate (Assié 2004). P. Turcry (Turcry 2003) a montré que l'utilisation des cendres volantes, augmente considérablement le retrait plastique. M. Valcuende et al (Turcry 2003, Valcuende, Parra et al. 2012) ont conclu que le retrait total des BAP, n'est que légèrement supérieur à celui de BOV, la différence étant de 9.2%. Les comportements mécaniques instantanés et différés des bétons autoplaçants et des bétons vibrés ont été analysés en fonction de la résistance en compression par assié (Assié 2004). Ce dernier conclut que, la résistance mécanique et le module d'élasticité, le retrait (endogène et dessiccation) des BAP sont équivalents à ceux mesurés sur les BOV. K. Ayed et al (Ayed, Benaïssa et al. 2011) ont fait une étude expérimentale afin de démontrer l'influence de la pouzzolane naturelle sur le comportement différé (retrait) du BAP. Les résultats par ces derniers ont montré que le retrait du BAP à base de filler calcaire est du même ordre que celui du BAP à base de pouzzolane naturelle, du moins au jeune âge. A long terme, l'hydratation lente de la pouzzolane induit un retrait plus important en raison d'un volume de CSH progressivement plus important.

1.4.2.2 *Déformation différé d'origine mécanique : le fluage*

Il est connu que la réponse du béton à une sollicitation mécanique n'est pas totalement instantanée, mais comporte une partie différée. On le constate en observant la déformation sous contrainte constante: elle croît dans le temps (fluage) (Baron and Sauterey 1988). Ce caractère différé du comportement rhéologique du béton durci joue un rôle important sur le fonctionnement et la durabilité des ouvrages et des constructions (Babafemi and Boshoff 2015). La déformation des structures en béton sous charge continue est connue pour être plusieurs fois plus grande que la déformation instantanée lors du chargement. Cela rend la déformation de fluage un facteur important à considérer à moyen et long terme (García-Taengua, Arango et al. 2014)

Plusieurs auteurs ont montré que le fluage des BAP est plus élevé que les BOV (Benkechkache, Boukni et al. 2008) (Bensebti, Houari et al. 2008). Certains auteurs (Proust and Pons 2001), (De Schutter, Bartos et al. 2008), (Turcry, Roziere et al. 2005) ont noté des déformations de fluage similaires pour les BOV et les BAP à résistance en compression équivalente. D'autres chercheurs (Turcry, Roziere et al. 2005), (Assié 2004), (Leemann and Hoffmann 2005), (Heirman, Vandewalle et al. 2008), (Loser and Leemann 2009) (Leemann, Lura et al. 2011) ont souligné que le fluage du BAP est plus élevé en comparant avec les BOV.

Leemann et al (Leemann, Lura et al. 2011) ont étudié l'influence du type de ciment sur le fluage des BAP et des BOV ayant un rapport E / C identique. Ils ont trouvé une diminution de

fluage pour les deux types de bétons avec la diminution de la teneur en clinker. Confirmant ainsi les résultats de (Khatri, Sirivivatnanon et al. 1995), (Zumbrunn, Markendorf et al. 2007), (Heirman, Vandewalle et al. 2008) qui ont observé une diminution de fluage avec la réduction de la teneur en clinker lorsque le ciment est remplacé par des cendres volantes ou de laitier. Le tableau suivant regroupe différentes caractéristiques principales des BAP selon plusieurs auteurs.

Nombre	L'auteur	fc28	E28	f flexion	humidité	type de ciment	c (kg/m3)	les fine	sable (kg/m3)	agregat (kg/m3)	l'eau	surplastifiant	l'air	affaissement	E/C
1	(Benkechkache and Houari 2009)	23,07			%50	CEM2 42	400	200 fillere	772	762	211		2,5	250	0,352
2	/	24,04			%50	CEM2 42	400	/	914,34	850,92	228,5		3	80	0,57
3	/	39,1			%50	CEM2 42	500	100 fillere	772	762	221		2,7	240	0,368
4	(Soleymani Ashtiani, Dhakal et al. 2011)	88,7	42,8	8,8	%50	CEM CENDRE 42	385	165 cendre	870	880	165	3,58		(75)250	0,27
5	/	69,4	42,4	9,4	%50	CEM CENDRE 42	385	165 cendre	605	1145	165	1,1			0,3
6	(Güneyisi, Gesoğlu et al. 2008)				%50	CEM1 KAOLIN (42)	350		894,3	1092,9	140	3,5		140	0,4
7	(Zhang, Zakaria et al. 2013)		40		%50	CEM1	370		838	993	185		4,4	30	0,5
8	(Valcuende and Parra 2009)	36,9			%50	CEMII42,5	350	45 fillere	1080,1	684,4	210	5,25	0,9	(69) 245	0,6
9	(Jun and Stang 1998)	50,8			%50	CEMI	345	85	750	1090	185				
10	(Ray, Gong et al. 2012)	38			%50	CEMI	396		699	1038				200	0,4

Tableau 1-4 Exemple de différentes compositions de BAP.

1.4.3 La porosité

Le béton est un matériau polyphasique. Il est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'autre phase gazeuse.

La porosité capillaire est une caractéristique micro-structurale qui influe sur les propriétés de transfert, ainsi que sur les performances mécaniques des bétons (Siad 2010). La méthode de mesure la plus utilisée pour caractériser les pores est celle de la "porosité accessible à l'eau" qui consiste à saturer le matériau sous vide.

(Valcuende, Parra et al. 2012) ont montré que l'utilisation une quantité importante de fine dans les BAP provoque une structure poreuse plus tortueuse que les BOV.

La figure (1-5) montre l'influence des fillers calcaire sur la porosité capillaire.

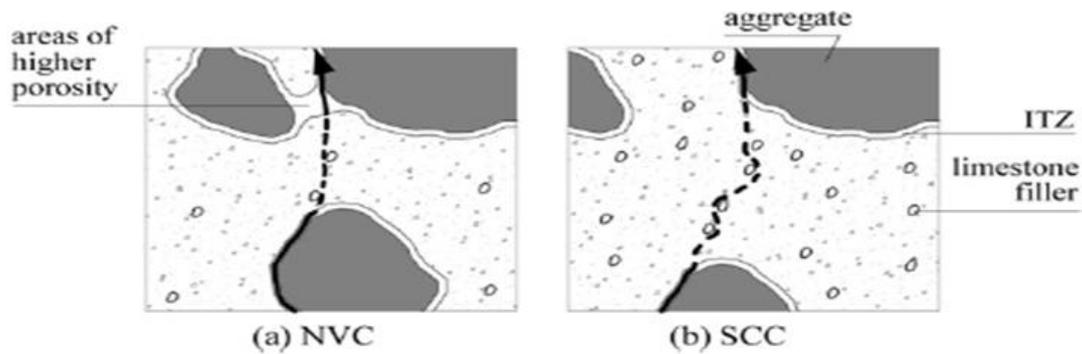


Figure 1-5 La porosité capillaire dans les BAP (Valcuende, Parra et al. 2012)..

1.4.4 Comportement à l'élévation de la température

L'utilisation des BAP a été étendue aux constructions des bâtiments (Okamura 1997). Lorsqu'ils sont utilisés dans des applications de construction, les éléments de structure en BAP doivent satisfaire aux exigences de résistance au feu spécifiées dans les codes du bâtiment. Le feu représente l'une des conditions environnementales des plus sévères auxquelles les structures peuvent être soumises (Sideris and Manita 2013). Par conséquent, il est nécessaire pour les ingénieurs de prendre grandement en considération les risques associés à des températures élevées lors de la conception des structures en béton. Par exemple l'écaillage explosif qui a été observé par de nombreux chercheurs se traduit souvent par une grave détérioration du béton (Belaidi, Kenai et al. 2016) (Ye, Liu et al. 2007) (Bangi and Horiguchi 2012) (Ozawa and Morimoto 2014). Le béton subit des écaillures à cause de deux phénomènes: le premier est la dilatation thermique de l'eau contenue à l'intérieur des pores du béton, ce qui génère une contrainte de compression biaxiale parallèle à la surface chauffée. Cette contrainte conduit par la suite à une contrainte de traction en développement dans la direction perpendiculaire à la surface chauffée. Le deuxième est l'accumulation de pression dans les pores du béton en raison de l'évaporation de l'eau liée chimiquement au ciment. Cela provoque une contrainte de traction dans la microstructure des bétons chauffés (Belaidi, Kenai et al. 2016) (Okamura and Ouchi 2003). Pour les mélanges de béton avec une structure plus fine de pores, tel que le BAP, cette pression interne n'est pas libérée, ce qui conduit à un écaillage de la surface du béton (Ozawa and Morimoto 2014).

1.4.5 Attaque sulfatique externe (ASE)

L'existence d'un grand nombre d'ions nocifs dans l'eau de mer ou dans les eaux souterraines, tels que l'ion chlore et les ions de sulfates radicaux, va menacer la durabilité des structures en béton. L'attaque des sulfates externes est un phénomène physico-chimique complexe dépendant de nombreux paramètres chimiques (type de sulfate, type de ciment, la formulation du béton, classe de l'exposition...etc.) et physiques (augmentation de la porosité, expansion, perméabilité...etc.).

De nombreux ouvrages de génie civil tels que les quais, les ponts, les fondations et les tuyaux en béton, sont exposés à l'environnement du sulfate de toutes leurs durées de vie (Chen, Chen et al. 2009) (Ranjani and Ramamurthy 2012) (Tosun-Felekoğlu 2012).

Le mécanisme de (ASE) est un déplacement des ions de sulfate dans les matériaux cimentaires à travers les pores au moyen de différents mécanismes de transport. La réaction entre ces ions et des espèces ioniques de la solution interstitielle (la phase AFM, les phases d'alumine et la CH) peut conduire à la précipitation de la formation de quelques particules

minéraux, comme le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ettringite ($[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6,12\text{H}_2\text{O}]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3,2\text{H}_2\text{O}$) et la thaumasite ($\text{Ca}_3[\text{Si}(\text{OH})_6,12\text{H}_2\text{O}] \cdot (\text{CO}_3) \cdot \text{SO}_4$) (Glasser et al. 2008). En raison de la précipitation de ces minéraux, la structure de la pâte durcie peut se détériorer en raison d'une expansion à l'intérieur du matériau (Glasser, Marchand et al. 2008). (Neville 2004) (Colleparidi 2003).

Il existe beaucoup de travaux sur, la détérioration du béton vibré dans un environnement sulfaté. Par contre peu d'informations sont disponibles sur le comportement du béton autoplaçant dans ce milieu sulfatique (Tosun, Felekoğlu et al. 2009) (Ghafoori, Diawara et al. 2008).

Les sources de ces sulfates peuvent être internes ou externes au matériau cimentaire (voir figure 1.6) (Orejarena and Fall 2010):

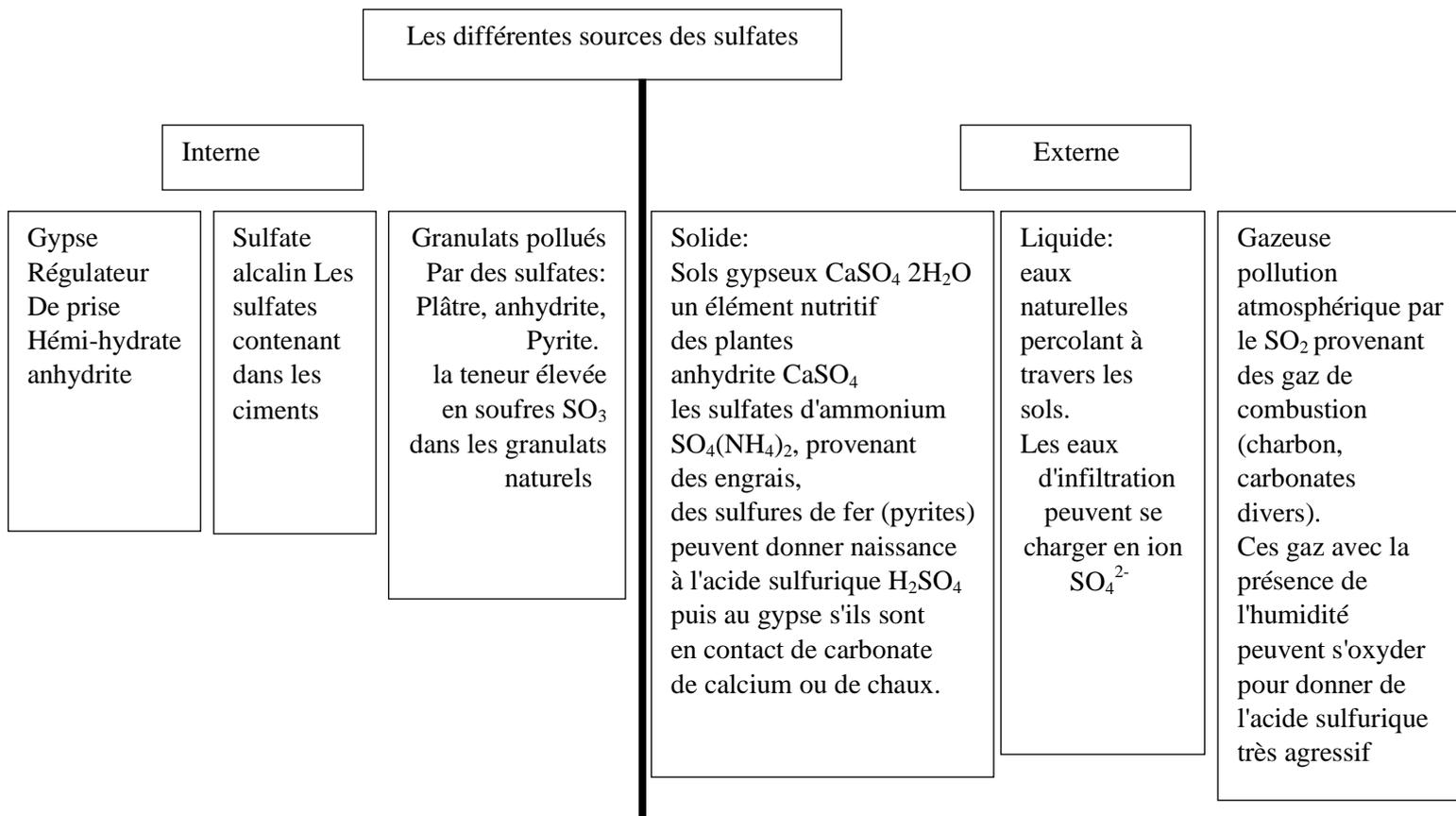
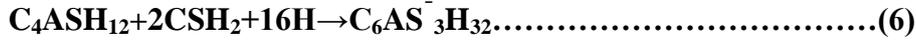
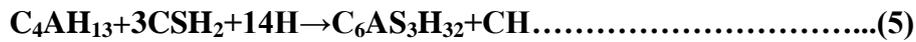


Figure 1-6 Différentes sources des sulfates (Orejarena and Fall 2010).

1.4.5.1 Mécanismes généraux de la dégradation des bétons attaqués par les sulfates externes

L'attaque des sulfates a été traditionnellement étudiée par deux principes: le premier c'est la formation de l'ettringite et le deuxième c'est la formation de gypse (Chen, Chen et al. 2009). La formation de l'ettringite dans une solution de sulfate de sodium suit un processus en trois étapes, qui sont la période de pénétration, la durée de l'amélioration de la résistance et la période de macro-fissure. Par conséquent, la fissuration du matériau béton est principalement attribuable à l'effet de l'ettringite. Par contre les formations de gypse se déroulent en deux phases, la phase de latence et la période d'accélération.

(Tosun, Felekoğlu et al. 2009) ont montré que la teneur du sulfate élevée modifié le mécanisme des réactions des sulfates et la formation de produits cimentaire. (Rozière, Loukili et al. 2009) ont supposé que les ions de sulfate sont susceptibles de réagir avec la portlandite et des produits d'hydratation riche en C₃A, Selon les équations ci-dessous.



1.4.5.2 *L'attaque sulfatique externe aux bétons autoplaçants*

Il y a peu de renseignements sur le comportement des BAP sous l'effet d'une solution sulfatique (Bassuoni and Nehdi 2009). Ces auteurs ont fait deux types d'exposition des BAP aux attaques des sulfates : immersion totale et mouillage/séchage jusqu'à 24 mois. Les résultats montrent que les BAP soumis à une immersion totale dans la solution de 5% de sulfate n'ont pas montré des dommages visuels distinctifs.

Ils ont conclu que les BAP peuvent être classés comme des bétons résistants aux sulfates. Ils ont noté aussi que le type d'exposition peut être un effet accélérateur de l'attaque de sulfate pour les BAP. (Behfarnia and Farshadfar 2013) ont étudié les effets de différents liants pouzzolaniques tels que la fumée de silice, la zéolite et le metakaolin sur la durabilité des bétons autoplaçants dans l'environnement du sulfate de magnésium. La variation de la résistance à la compression, l'évaluation de la masse et les dimensions des éprouvettes de béton ont été mesurées après une immersion de 6 à 9 mois dans 5% et 10% de la solution du sulfate de magnésium. Les résultats ont montré que les BAP à base de metakaolin et de zéolithe ont donné de meilleurs comportements que les BAP à base de fumée de silice. Par ailleurs, les fibres de polypropylène réduisent la perte de masse des échantillons. (Persson 2003) a présenté une étude expérimentale sur la résistance aux sulfates des bétons autoplaçants. A cet effet, plus de 40 cylindres de béton ont été fabriqués et soumis à une solution de sulfate de sodium pendant 900 jours. Les résultats montrent une perte de masse importante de BAP que celle de BV. Cela probablement est dû à la teneur élevée en filler calcaire dans les BAP.

1.5 Conclusion

Le béton autoplaçant (BAP) est un nouveau béton qui commence à prendre une place considérable dans l'industrie du bâtiment et des travaux publics.

A partir des paragraphes précédents, on conclut que les BAP se comportent différemment que les BOV particulièrement pour la formulation, la déformation différée et la durabilité (comportement au feu, l'attaque chimique ...etc.). Quelques études montrent que les BAP ont de meilleures performances mécaniques que les BOV. Cela est dû probablement à la présence élevée des additions minérales (filler...etc.) jouant un rôle de remplissage des pores. Par contre cette teneur élevée des fines provoque une déformation différée importante dans les BAP que les BOV.

L'introduction de fibres dans les bétons autoplaçants va étendre leurs avantages : comme la limitation des propagations des fissures, l'amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction, à la flexion) et l'amélioration de la ténacité du béton durci. Pour ces raisons, dans le chapitre suivant, nous décrivons le rôle de différents types de fibres sur le comportement et la durabilité des BAP.

Chapitre 2

Effet des différents types de fibres sur le comportement des matériaux cimentaires (BAP, BOV, mortier)

2.1 Généralité sur les fibres

2.1.1 Différents types de fibres utilisés pour le renforcement des bétons

L'utilisation d'une fibre comme renfort au sein d'une matrice, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques du couple matrice/fibre. Il existe sur le marché diverses catégories de fibres pouvant être incorporées dans le béton. Ces fibres sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques (Hadjoudja 2014):

- Synthétique : acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène;
- Métallique : inoxydable, galvanisé, fil étiré à froid, tôle découpée et extrusion de matière fondue;
- Verre : sodocalcique, borosilicaté;
- Naturelle : bagasse, noix de coco, jute, maguey, banane, chanvre, palmier et bambou.

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres en termes de dimensions (diamètre, longueur...), de formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), de résistance à la traction et d'adhérence au béton.

2.1.2 Caractéristiques et propriétés des fibres

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques. Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent:

- Etre faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide);
- Se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent:

- Etre déformables sans être fragiles;
- Etre relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique;
- Offrir une bonne capacité de déformation;
- Posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire;
- Présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment.

En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier.

2.1.3 Domaines d'application des bétons fibrés

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil (Ferrara, Bamonte et al. 2012):

- Béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.);

- Béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.);
- Béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.);
- Mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement. Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

Dans les paragraphes suivants on parlera du rôle des différentes fibres dans les bétons en générale et dans les BAP en particulier.

2.2 Bétons fibrés

2.2.1 Définition

Lors de la formulation de ce béton, des fibres sont ajoutées aux divers matériaux qui le composent. La répartition homogène des fibres permet d'obtenir un béton avec des performances améliorées.

L'utilisation des fibres peut remplacer certaines armatures, ce qui facilite l'application de ce type de béton dans divers domaines de génie civil.

2.2.2 Fonctionnement des fibres dans les bétons autoplaçants

L'introduction de fibres dans les bétons autoplaçants va étendre leurs avantages : comme la limitation des propagations des fissures, l'amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction et à la flexion) et l'amélioration de la ténacité du béton durci (Ferrara, Bamonte et al. 2012). Concernant les caractéristiques à l'état frais des BAP (la maniabilité et la capacité d'écoulement dans les milieux confinés) l'incorporation des fibres peut influencer négativement ces propriétés.

2.2.2.1 *Influence des fibres sur les bétons autoplaçants à l'état frais*

Les fibres sont connues pour affecter les caractéristiques de maniabilité et la capacité d'écoulement de béton frais (Hamzaoui, Guessasma et al. 2014). La diminution de ces caractéristiques dépend du type et de la teneur de fibres. (Anastasiou, Papayianni et al. 2014) ont montré une diminution notable de la maniabilité des BAP en fonction de la teneur en fibres. Ils ont trouvé aussi que la ségrégation augmente avec la teneur de fibres. Les auteurs ont noté une augmentation considérable de la densité, à cause de la présence des fibres d'aciers. (Ferrara, Bamonte et al. 2012) ont étudié des BAP renforcés de fibres métalliques. Ils concluent que les fibres limitent les fissures du retrait du béton au jeune âge. Ils trouvent aussi que l'introduction de ces fibres affecte les caractéristiques de l'ouvrabilité des BAP. (Hamzaoui, Guessasma et al. 2014) ont fait une étude expérimentale sur l'effet des fibres de polypropylène et métalliques sur la fluidité des BAP. Les caractéristiques de l'écoulement ont été évaluées en fonction de l'essai de l'étalement, le V-funnel et l'essai de la boîte en L. Ils ont constaté qu'il est tout à fait possible d'atteindre les propriétés autoplaçantes avec l'utilisation d'un renfort fibreux, même si l'introduction des fibres et le type de fibres influencent la fluidité du béton.

Il existe une teneur maximale de fibres qui pourrait être utilisée pour produire des BAP fibrés.

Effet des différents types de fibres sur le comportement des matériaux cimentaires (BAP, BOV, mortier)

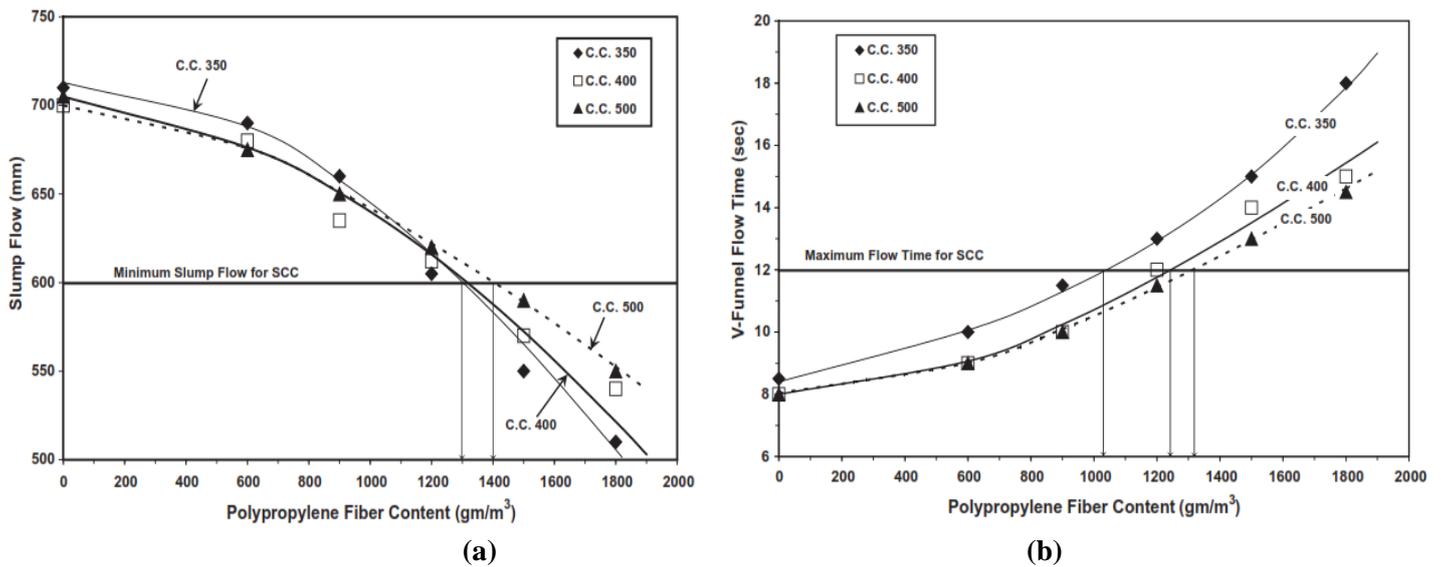


Figure 2-1 Effet de la teneur en fibre sur l'étalement des BAP (a) et sur le v-funnel (b) (A.S. El-Dieb et al 2012)

La figure 2.1 montre l'effet de la teneur en fibres sur l'étalement et le temps d'écoulement de V-funnel. Les auteurs ont observé que la teneur maximale des fibres pour obtenir un BAP est de 1300 à 1400g/m³. Ils ont mentionné également que la maniabilité de BAP fibrés est non seulement affectée par le volume de fibres et le type de fibre mais aussi par la composition du mélange.

(Ferrara, Bamonte et al. 2012) ont montré que la capacité de dispersion de fibres représente un élément clé influant sur les performances à l'état frais des BAP renforcés de fibres.

Tableau 2-1 Effet du taux et des caractéristiques des fibres sur les propriétés à l'état frais des BAP

L'auteur (année)	Formulation						Le type de fibre	L/D /F	Dosa -ge kg/m ³	Étalement D	V funnel	Boit-L	Jirrin-g	densité	
	C	F	S	G	E	S P									
(El-Dieb 2009)	1	334	100	939	675	164	7	Métallique	5 /.	50	390	12.8	/	595	2360
	2	334	100	939	675	164	7			25	560	10.5	/	530	2420
	3	334	100	939	675	164	7			0	610	5.8	/	/	2370
(Corinaldesi and Moriconi 2011)	1	460	92	912	608	253	4	Plastique	20/0.25	0	720		/	600	
	2	460	92	912	608	253	4			0.5	620		0.079	520	
	3	460	92	912	608	253	4			1	600		0.069	500	
	4	460	92	912	608	253	4			1.5	500		0	300	

2.2.2.2 *Influence des fibres sur le comportement des bétons à l'état durci*

❖ Les performances mécaniques

(Anastasiou, Papayianni et al. 2014) ont trouvé que la vitesse d'impulsion est légèrement diminuée lorsque en augmentant la teneur en fibres. Ce qui peut être attribué à la présence des vides dans la zone de transition entre les fibres et la pâte. Les résultats de la résistance à la compression sont diminués aussi avec l'augmentation de la teneur en fibres. Par contre la teneur élevée de fibres semble contribuer à une bonne ténacité à tous les niveaux de chargement. (Mazaheripour, Ghanbarpour et al. 2011) ont réalisé une étude expérimentale sur l'effet des fibres de polypropylènes sur les performances à l'état frais et durci des bétons autoplacants légers. Leurs résultats ont indiqué que ce type de renfort n'améliore pas la résistance à la compression et le module d'élasticité. Par contre ils ont observé une augmentation de la résistance à la traction par fendage et à la flexion de 10.7 % et 14.4% respectivement. (Anastasiou, Papayianni et al. 2014) ont rapporté que la résistance et la ténacité des BAP augmentent avec une teneur en volume de 0,3% et 0,5% de fibres de polypropylènes et d'acier respectivement. (Kakooei, Akil et al. 2012) (Banthia and Sheng 1996) ont trouvé que la liaison interfaciale entre les fibres de Polypropylène et la pâte de ciment est faible en raison de la surface lisse de la fibre. Ils n'ont également observé aucune amélioration de la résistance des bétons avec des fibres de polypropylène, même à une fraction volumique de 5%. Cependant, le polypropylène est chimiquement inerte et hydrophobe, ce qui élimine la possibilité d'une liaison chimique. Par conséquent, la fibrillation a un effet considérable sur la résistance.

❖ Déformation différée (retrait et fluage)

Plusieurs auteurs ont montré l'efficacité de l'introduction de fibres sur la lutte contre la fissuration par retrait plastique des bétons (Corinaldesi and Moriconi 2011). Ainsi, les fibres ont un effet positif sur la réduction de la fissuration du béton due au retrait de séchage. (Corinaldesi and Moriconi 2011) ont étudié l'effet de trois types de fibre en acier, poly-alcool vinylique (PVA) et polypropylène à forte ténacité (PPHT) sur le retrait des bétons autoplacants. Ils ont trouvé que la présence des fibres quel que soit leur type dans les BAP provoque une réduction du retrait de séchage avec des valeurs d'environ de 100µm/m.

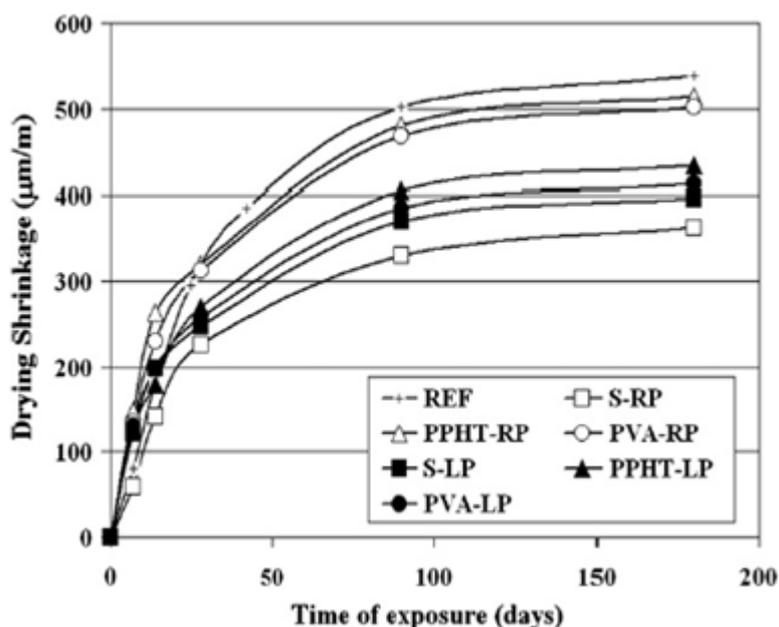


Figure 2-2 Evolution du retrait de séchage de différents bétons fibrés (Corinaldesi and Moriconi 2011).

L'introduction des fibres métalliques dans les bétons autoplaçants ou ordinaires semble augmenter les déformations sous charge maintenue en flexion ou en traction (Marangon, Toledo Filho et al. 2012) (Bissonnette and Pigeon 1995) (Chern and Young 1989). Par contre dans une autre étude de (Garas, Kahn et al. 2009) trouvent que l'incorporation des fibres d'acier courtes à 2% en volume diminue le coefficient de fluage en traction de 10%. (Kurtz and Balaguru 2000) ont étudié l'effet des fibres de polypropylènes et de nylon avec une fraction volumique de 0.1% sur le comportement du fluage en flexion des bétons. Leurs résultats montrent que les bétons avec les fibres de polypropylènes ont eu une résistance initiale plus élevée. Par contre, les bétons avec les fibres de nylon (FRC) donnent des résistances plus élevées à long terme.

2.2.2.3 Durabilité

❖ Propriétés de transferts

En général, la variation de la quantité de fibres d'acier n'apporte aucune influence significative sur le coefficient de sorption des BAP fibrés. Toutefois, ce coefficient est influencé par la croissance du rapport Eau / Poudre. (Anastasiou, Papayianni et al. 2014) ont introduit les fibres métalliques avec un 0.7% par rapport au volume du béton soumis au gèle dégel et la diffusion du chlorure. Les mélanges avec cette teneur de fibres ont montré une légère augmentation de la teneur en chlorures mesurées à l'intérieur du béton. Cela est également rapporté par (El-Dieb and Hooton 1995) qui ont confirmé que le coefficient de diffusion ne change pas avec l'introduction de fibres d'acier dans les bétons.

(Choi and Yun 2015) ont trouvé que les BAP à base de laitier et de fibres d'acier montrent une bonne résistance à la carbonatation et au cycle gèle-dégel. (Berrocal, Löfgren et al. 2015) ont montré que l'introduction des fibres limite la croissance des fissures, par conséquent la

perméabilité du béton diminue. Tandis que la diffusion des chlorures dans le béton non fissuré, semble ne pas être affectée par l'ajout de fibres. Par ailleurs les fibres d'acier à faible teneur en carbone subissent une corrosion sévère lorsqu'elles sont situées près de la surface du béton. Bien que certains chercheurs indiquent que les fibres peuvent améliorer la résistance à la corrosion des armatures. (Bassuoni and Nehdi 2009) ont montré que les fibres de polypropylènes réduisent la perte de masse dans les échantillons soumis aux attaques sulfatiques.

❖ Comportement sous élévation de la température

Dans la littérature il a été largement démontré que les fibres polypropylènes (PP) sont très efficaces pour atténuer de l'écaillage, surtout dans les bétons à haute performance exposés à des températures élevées (Sideris and Manita 2013) (Sideris and Manita 2013). (Okamura and Ouchi 2003) ont mentionné que le polypropylène fond à 160-168°C alors que l'apparition des écailles des bétons se situe à une température comprise entre 190 et 250 ° C. Cette fusion de ces fibres crée une voie supplémentaire pour la libération de la pression interne de l'évaporation de l'eau.

(Bangi and Horiguchi 2011) ont utilisé trois teneurs de fibres de polypropylènes 1, 2 et 3 kg/m³ dans les bétons à haute performance. Ils ont conclu que le dosage optimal qui donne de bonnes propriétés mécaniques résiduelles des BHP durant le chauffage est de 2 kg/m³. (Anastasiou, Papayianni et al. 2014) ont montré que les BAP sans fibre ont une perte de résistance à la compression de 17%, 67% et 94% par rapport à la résistance initiale sous une température de 300°C, 600 C° et 900 C° respectivement. Cette grande perte de résistance est due à une faible perméabilité et une microstructure dense des bétons sans fibres. Par contre le BAP renforcé par les fibres polypropylènes a une perte de résistance à la compression faible que le BAP témoin.

2.3 Conclusion

À partir de cette étude on conclut que l'introduction des fibres quel que soit leur type influe sur le comportement des BAP à l'état frais, durci et vis-à-vis de la durabilité. A titre d'exemple les fibres métalliques diminuent le retrait à long terme. De plus les fibres polypropylène empêchent le retrait plastique et l'écaillage du béton soumis à l'élévation de la température.

Par contre l'utilisation des fibres métalliques et synthétique va favoriser des émissions de CO₂ pendant leur fabrication. Ainsi le coût revient plus cher avec l'utilisation des ressources non renouvelables. Par conséquent, la possibilité de les remplacer par des fibres naturelles se concrétise de plus en plus. Ceci se confirme par les récentes recherches et les enquêtes effectuées (de Andrade Silva, Mobasher et al. 2009).

Dans les paragraphes suivants on va étudier l'effet des fibres végétales sur les matrices cimentaires et sur les bétons autoplaçants.

2.4 Les fibres végétales

2.4.1 Introduction

L'industrie des matériaux composites ne cesse d'évoluer en mettant en place de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. La substitution des matériaux d'origine fossile par des matériaux d'origine naturelles (et surtout végétales) commencent à voir le jour. C'est dans ce contexte que notre travail de recherche est proposé. (Ringuette 2011) mentionne que les fibres naturelles ont, sans aucun doute, été les premières à être utilisées par l'homme. Pourquoi peut-il être intéressant d'utiliser des fibres naturelles? Tout d'abord, les impacts environnementaux des fibres naturelles sont beaucoup moindres que les fibres artificielles. Ces fibres sont biodégradables et renouvelables. De plus, il peut être important de valoriser une ressource locale dans certains pays. Ces fibres naturelles peuvent également, permettre d'atteindre des propriétés mécaniques intéressantes, tout en réduisant de façon significative le coût des composites.

Ainsi, nous allons essayer de mettre en place un matériau cimentaire, tel que le béton, renforcé de fibres végétales afin de répondre à des objectifs environnementaux, écologiques, économiques et des performances physico-mécaniques.

2.4.2 Type de fibres végétales

Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante : des graines (poils séminaux), de la tige ou du tronc (fibres libériennes), des fruits (enveloppe) ou des feuilles. Le bois est un cas particulier (composition, structure, etc.) qui doit être traité séparément.

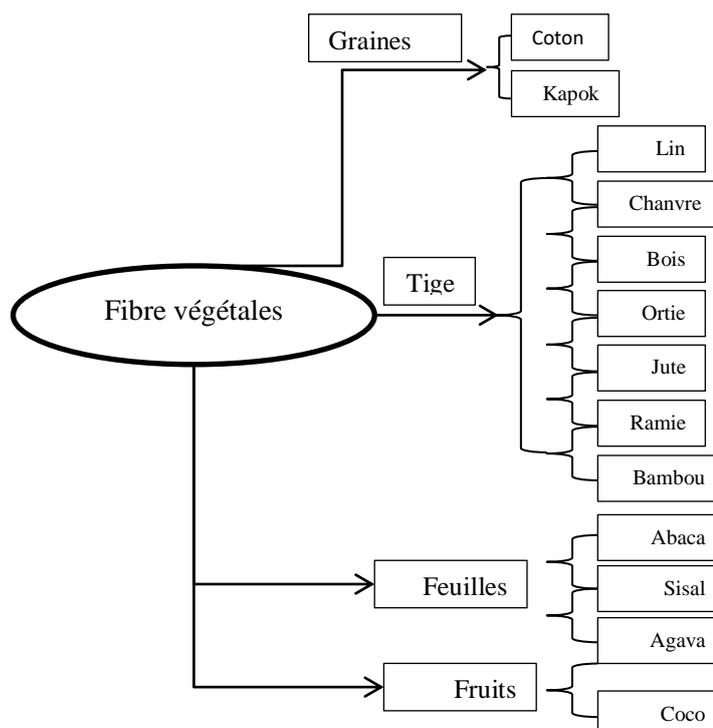


Figure 2-3 Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines.

Parmi les fibres végétales on distingue :

- **Le chanvre** (Cannabis) est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 m (comme le lin) (Hamzaoui, Guessasma et al. 2014). Il se développe beaucoup plus en Chine, au Canada et en Europe. Cette fibre possède une résistance élevée à la traction d'environ 600 à 1100 MPA. Ce qui favorise son utilisation dans plusieurs domaines tels que : le papier et le renforcement des bétons.
- **La chènevotte** ou granulats de chanvre, qui désigne la partie intérieure fragmentée de la tige de chanvre. Elle résulte d'un processus de défibrage industriel de la paille de chanvre par battage mécanique. A l'issue de cette opération, les particules sont dépoussiérées et calibrées. Elle présente 42% de la plante de chanvre (Magniont 2010).



Figure 2-4 Fibre de chènevotte (a) et de chanvre (b)

- **Le palmier dattier** (phoenix dactylifera) est l'une des plantes les plus cultivées dans le monde. On la trouve couramment dans les climats secs afro-asiatiques qui s'étendent de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient. Elle s'acclimate aux milieux froids, secs et chauds (Nous allons utiliser pour notre étude les fibres de surface). Chaque année, d'énormes quantités de déchets de fibres de palmier sont jetés après les opérations d'élagage. (Kriker, Debicki et al. 2005). Le nombre d'arbres de Deglet-Nour en Algérie est en fait estimé à 6,9 millions plantés dans les provinces de Biskra, Ouargla, El Oued et Ghardaia (Agoudjil, Benchabane et al. 2011).



Figure 2-5 Différentes fibres de palmier dattier.

- **Le Dis** (*Ampelodesmos mauritanicus*) est une plante herbacée robuste, vivace, rhizomateuse, qui peut atteindre de 2 à 3 m de haut. Cette plante est une grande graminée répandue en grande quantité dans l’Afrique-du-Nord méditerranéenne et les régions sèches de la Grèce à l’Espagne. Elle existe également dans le sud-est de la France. Cette plante était utilisée dans la réalisation des habitations anciennes de ces régions en raison de ses qualités mécaniques et hydriques. Sa nature fibreuse est susceptible d’offrir aux matériaux cimentaires les qualités apportées par les fibres classiques (métalliques et polypropylènes). (Sellami, Merzoud et al. 2013)
- **L’alfa** (*Stipa Tenacissima L*) est une espèce de plantes monocotylédones de la famille des Poaceae. Cette plante permanente ne disparaît pas pendant l’hiver. Grâce à sa faible consommation d’eau, l’alfa est endémique dans l’ouest de la méditerranée, une région plutôt sèche. Les tiges d’Alfa sont composées de filaments celluloseux liés par de la lignine, des pectines et de l’hémicellulose. L’Algérie, par exemple, dispose de 4 millions de tonnes de cette plante (Rogge 2009).



Figure 2-6 Fibre de Dis.

2.4.3 Effets des fibres végétales sur le comportement des matériaux cimentaires

Dans la littérature, il y a très peu de travaux de recherche sur l’influence des fibres végétales et leur comportement sur les bétons autoplaçants. Généralement les fibres naturelles en raison de leur caractère hydrophile avec une absorption d’eau élevée réduisent la maniabilité et quelques caractéristiques à l’état frais des bétons ou des mortiers (John, Cincotto et al. 2005) (de Andrade Silva, Chawla et al. 2008) (Ahmed 2013). Plusieurs chercheurs comme (Mohamed, Ghorbel et al. 2010) ont trouvé que les fibres naturelles réduisent la ségrégation statique des BAP. Par conséquent ce type de renfort joue un rôle d’agent de viscosité (El Hilali 2009). (Li, Wang et al. 2006) ont noté que la réduction de la

densité humide des bétons contenant les fibres de chanvres est probablement due à la création des vides entre la fibre et la matrice. (Ahmed 2013) a montré que l'ajout des fibres de lin avec une quantité de 2 kg/m^3 réduit la maniabilité des BAP. (Laifa, Behim et al. 2014) ont conclu que l'utilisation des fibres cellulosique (Dis) est moins préjudiciable que les fibres polypropylène sur l'ouvrabilité des BAP pour un même volume utilisé. En outre, plusieurs chercheurs ont montré que la dissolution de matières extractibles de la surface de la fibre dans le mélange de ciment perturbe l'hydratation du ciment et retarde le début de prise (Sedan, Pagnoux et al. 2007) (Diquélou, Gourlay et al. 2015) (Tonoli, Savastano et al. 2010). Sedan (Sedan, Pagnoux et al. 2007) ont expliqué que les fibres de chanvre ayant une forte teneur en pectine, fixent sur leur surface les ions calcium Ca^{2+} et les ions hydroxydes OH^- de la matrice cimentaire. Ils ont observé un déficit en ions d'hydroxyde de calcium dans la phase interstitielle, entraînant une inhibition des hydrates de silicate de calcium (CSH) et, par conséquent, induisant des retards de prise.

Concernant l'état durci, plusieurs chercheurs ont montré que l'incorporation des fibres végétales permet d'améliorer à court et moyen termes le comportement en flexion (ténacité et éventuellement la résistance maximale) du composite (de Andrade Silva, Toledo Filho et al. 2010, Ardanuy, Claramunt et al. 2015) (de Andrade Silva, Mobasher et al. 2009). (Ahmed 2013) a trouvé une amélioration notable des résistances à la compression et à la traction par fendage des BAP contenant 2 kg/m^3 de fibre de lin atteignant respectivement 8,3 % et de 17,6 %. (Awwad, Mabsout et al. 2012) ont trouvé une augmentation de la résistance en flexion de 15-30 % pour les bétons avec 0.5% de fibres de chanvre et une diminution de la résistance à la compression de 20% à 28 jours. Walid Laifa (Laifa, Behim et al. 2014) ont expliqué que l'amélioration de la résistance en traction par flexion des BAP avec la fibre de Dis est due probablement à la rugosité de cette fibre. Cette dernière constitue des épines qui favorisent l'ancrage de la fibre dans le matériau cimentaire. (Li, Wang et al. 2006) ils ont conclu que l'augmentation de la ténacité et la résistance en flexion sont en corrélation avec la teneur en fibres. La résistance à la compression est fortement liée à l'interaction de la taille des agrégats et de la longueur des fibres. (Ali, Li et al. 2013) ont utilisé des fibres noix de coco avec différents longueur et diamètre dans les bétons. Ils ont constaté que les fibres possèdent adhérence maximale au béton lorsque la longueur des fibres est de 30 mm. *Kriker et al* (Kriker, Debicki et al. 2005) ont réalisé une étude portant sur quatre types de fibres de palmier dattier pour un dosage en volume de 3.2% et une longueur de 15 à 60 mm. Ils n'ont constaté que l'augmentation de la longueur et le volume de fibre provoquent une amélioration de la résistance à la flexion et du coefficient de la ténacité. Ils ont conclu aussi que les fibres de surface des palmiers dattiers avaient une force de traction plus élevée par rapport aux autres types de fibres de palmier dattier.(Bahloul, Bourzam et al. 2009) ont utilisé les fibres d'alfa dans les mortiers cimentaires avec des pourcentages volumique de (0.5, 1, 1.5, 2 et 3)% et une longueur variant de 4.5 à 4.75 cm. Les résultats de leurs travaux ont révélé que le pourcentage optimal des fibres à incorporer dans le mortier est de 1%. Cependant, ils ont constaté que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur de fibres dans les mortiers.

Par ailleurs, (Ozerkan, Ahsan et al. 2013) ont utilisé les fibres des feuilles du palmier dattier dans les mortiers cimentaires. Ils ont constaté que l'incorporation de ces fibres

améliore la résistance à la flexion et la résistance aux attaques des sulfates de ces mortiers cimentaires. En outre, le retrait de séchage est diminué avec l'augmentation de la teneur en fibres. (Ramli, Kwan et al. 2013) ont utilisé des fibres courtes de noix de coco dans les bétons à haute performance durcis dans trois environnements différents: à l'air libre, dans l'eau de mer avec un cycle de séchage/mouillage pendant 14 jours (4 jours de mouillage + 10 jours de séchage) et immersion continue dans l'eau de mer. Ils ont conclu que la pénétration des chlorures et la profondeur de carbonatation sont diminuées avec l'augmentation de la teneur en fibres dans les bétons. Ces résultats signifient que les fibres limitent détérioration et la fissuration des bétons soumis aux attaques chimiques.

2.4.4 Durabilité des fibres végétales dans les matériaux cimentaires

La dégradation des fibres naturelles immergées dans le ciment Portland est due au milieu alcalin qui dissout les phases de la lignine et de l'hémicellulose de ces fibres (Pacheco-Torgal and Jalali 2011). Gram (Gram 1984) a été parmi les premiers auteurs à étudier la durabilité du béton avec les fibres de sisal et de noix de coco. La dégradation de ces fibres a été évaluée en les exposant à des solutions alcalines, puis en mesurant les variations de leur résistance à la traction. Cet auteur a remarqué un effet délétère des éléments Ca^{2+} sur la dégradation des fibres. Il a également annoncé que les fibres pouvaient préserver leur flexibilité et leur résistance dans les zones de béton carbonaté avec un pH de 9. Toledo Filho et al. (Toledo Filho, Scrivener et al. 2000) ont également étudié la durabilité des fibres de sisal et de noix de coco lorsqu'elles sont immergées dans des solutions alcalines. Les fibres de sisal et de noix de coco sont conditionnées dans une solution de l'hydroxyde de sodium. Les auteurs ont remarqué après 420 jours d'immersion, une diminution de la résistance à la traction des fibres de 72,7% et 60,9% pour le sisal et de noix de coco respectivement. La capacité des fibres naturelles à absorber l'eau est une autre façon de diminuer la durabilité du béton fibré. L'absorption de l'eau entraîne des changements de volume qui peuvent induire des fissures dans le béton (Tonoli, Joaquim et al. 2007). Afin d'améliorer la durabilité des matériaux cimentaires renforcés par des fibres, les deux voies suivantes pourraient être utilisées:

2.4.4.1 *Modification de la matrice*

L'introduction des sous-produits pouzzolanique dans les bétons en substituant le ciment provoque une diminution de la quantité d'alcalin (Mohr, Biernacki et al. 2007). Ainsi, la durabilité des fibres est améliorée. Les résultats de (Mohr, Biernacki et al. 2007) montrent que l'utilisation de mélanges ternaires contenant du laitier du métakaolin et de la fumée de silice sont efficaces pour prévenir la dégradation des fibres. De même, la carbonatation rapide peut induire une diminution d'alcalinité de la solution cimentaire (Agopyan, Savastano Jr et al. 2005). L'utilisation de polymères à base de ciment peut contribuer à accroître la durabilité des fibres (Pimentel, Beraldo et al. 2006). D'Almeida et al. (d'Almeida, Melo Filho et al. 2009) ont utilisé des mélanges où 50% de ciment Portland a été remplacé par du métakaolin. Ce qui fait disparaître pratiquement totalement l'hydroxyde de calcium. Par conséquent la migration de cette particule vers la surface des fibres est empêchée et la dégradation des fibres est évitée.

2.4.4.2 *Modification au niveau de la fibre*

(Toledo Filho, Ghavami et al. 2003) ont montré que l'utilisation d'un hydrofuge sur les fibres de bambou réduit l'absorption d'eau de ces renfort jusqu'à 4%. D'autres les chercheurs (Pimentel, Beraldo et al. 2006) ont montré que l'utilisation un composant organique tel que les huiles végétales réduit le processus de dégradation des fibres.

Ainsi, le traitement alcalin des fibres développe leur résistance et leur adhésion à la matrice (Sedan, Pagnoux et al. 2008). Tonoli et al. (Tonoli, Rodrigues Filho et al. 2009) ont comparé les pâtes de ciment avec des fibres végétales soumises à une modification de surface avec le méthacryloxypropyltri-méthoxysilane (MPTS) et avec l'aminopropyltri-éthoxysilane (APTS). Leurs résultats ont montré que les fibres modifiées par MPTS exemptes de produits d'hydratation de ciment. Tandis que les fibres à base d'APTS présentent une minéralisation accélérée, ce qui conduit à un comportement de fragilisation plus élevé des fibres. Toledo et al. ont recommandé l'immersion de la fibre dans une suspension de fumée de silice avant de l'ajouter au mélange (Toledo Filho, Ghavami et al. 2003). D'autres auteurs ont mentionné que l'utilisation de fibres en poudre peut améliorer les performances de durabilité (Savastano Jr, Warden et al. 2001).

2.5 **Conclusion**

S'agissant des fibres végétales, leur introduction dans le béton autoplaçants est restée timide malgré les multiples avantages économiques, écologiques et techniques qu'elles pourraient procurer. Ainsi, la contribution de ce travail s'inscrit dans une démarche de caractérisation du comportement à l'état frais, à l'état durci et vis-à-vis de la durabilité des bétons autoplaçants avec des renforts végétaux (Chanvre, Chênevotte, Dise, Alfa, Palmier Dattier). Afin de répondre aux questions majeures suivantes:

- Peut-on réaliser un béton autoplaçant contenant des fibres végétales avec une bonne ouvrabilité sans toutefoistoucher aux performances mécaniques, physiques et de durabilité à long terme?
- Est-ce que les fibres végétales avec une légère densification et une grande capacité de déformabilité; permettent-elles un écoulement facile par une grande fluidité du BAP?
- Est-ce que le remplacement partiel du ciment par du metakaolin protégerait les fibres dans les mortiers cimentaires.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche qui a pour objectif d'établir un plan expérimental relatif à l'utilisation de cinq différentes fibres végétales (Dis, Alfa, Palmier Dattier, Chanvre, Chênevotte) dans les BAP et les mortiers cimentaires.

Chapitre 3

Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

3.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la description des matériaux et protocoles expérimentaux utilisés pour la réalisation du programme expérimental de nos travaux de recherche.

Nous procéderons donc dans cette partie, successivement à la présentation des essais et procédure, à l'identification des matériaux de base utilisés et à la caractérisation des matériaux élaborés.

On utilise une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement pour confectionner des bétons autoplaçants et des mortiers pouzzolaniques. Les différents constituants utilisés sont:

- CEM I/42.5
- CEMI/52.5
- Fillers calcaires UF5
- Metakaolin
- Granulats (sable et gravier) de la carrière d'AIN ABID,
- Sable normalisé (de France)
- Superplastifiant GLENIUM 26
- Superplastifiant GLENIUM 27
- Eau du robinet des réseaux urbains,
- Fibres végétales de chanvre, de chènevotte, de palmier dattier, de Dis et d'Alfa
- Fibre synthétique (polypropylène) de chez GRANITEX et de chez Sika.

3.2 Granulats

La norme (NF P18-541) montre que les granulats présentent des caractéristiques, pouvant leurs permettre d'être utilisés pour la confection des bétons. Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

3.2.1 Analyse granulométrique

Les granulats sont d'origine naturelle concassés calcaires proviennent de la carrière de AIN ABID (est d'Algérie). De cette carrière, nous avons pu et obtenir trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravier 3/8, 8/15. L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. Les résultats de l'essai effectuer pour les granulats utilisés est présenté dans la Figure 3-1.

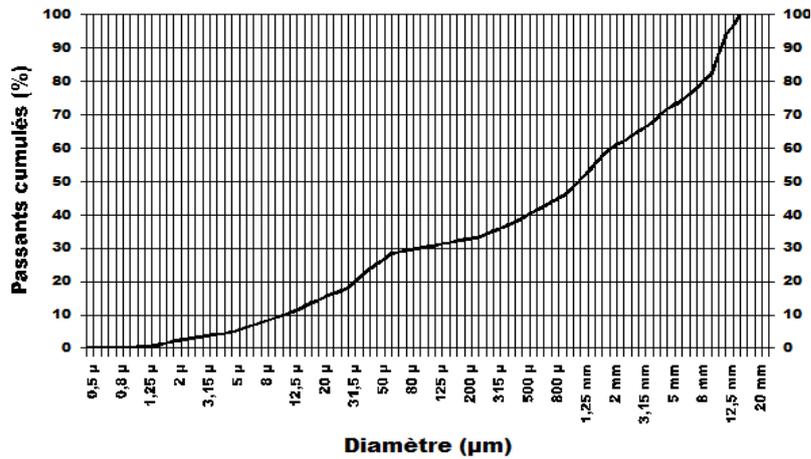


Figure 3-1 Courbe granulométrique des mélanges.

Un sable normalisé a été utilisé pour confectionner les mortiers à base de metakaolin.

3.2.2 Coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3)

L'essai de la détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des essais permettant de caractériser la forme des granulats. L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NF EP 18-553).

A_i : le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes, il est exprimé en pourcentage.

$$A_i = \sum \frac{M_{gi}}{M_{ei}} \times 100$$

M_{gi} : Masse de chaque classe granulaire d/D en grammes.

M_{ei} : Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante.

A : Coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

$$A = \sum \frac{M_e}{M} \times 100$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 Coefficient d'aplatissement.

Le coefficient d'aplatissement (Fi) est donné par : $A = \sum \frac{M_e}{M} \times 100$				8/15
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		Aplatissement partiel
Classe granulaire en (mm)	Mg (gr)	Ecartement des grilles	Passant Me	$\frac{M_e}{M_g} \times 100$
50		31,5		
40-50		25		
31.5 – 40		20		
25 – 31.5		16		
20 – 25		12,5		
16 – 20	4,4	10		
12.5 – 16	747,1	8	106,3	
10 – 12.5	1494,7	6,3	186,4	
8 – 10	502,2	5	62,9	
6.3 – 8	172,2	4	17,2	
5 – 6.3	12,0	3.15		
4 – 5		2.5		
M= \sum Mg = 2932,6 gr		M= \sum Me = 372,8 gr		A (%) 13%

3.2.3 Masse volumique absolue et apparente des granulats

La masse volumique est l'une des plus importantes caractéristiques physiques des granulats influençant sur le comportement de béton frais et par conséquent leur performance après durcissement. Différentes masses volumiques peuvent être définies pour les granulats : masses volumiques apparente et absolue (NF EN 1097-3). Le Tableau 3-2 présente différents granulats utilisés.

Tableau 3-2 Valeurs des masses volumiques des granulats utilisés.

	Absolut (kg/m ³)	Apparente (kg/m ³)
Sable	2600	1446,63
Gravier (3/8)	2631,578	1412,3
Gravier (8/16)	2631,578	1364,3

3.2.4 Essai au bleu méthylène et à l'équivalent de sable

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé pour déterminer la propreté d'un sable et les différents types d'argiles qu'il contient. L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Le

tableau 3-3 montre les valeurs de bleu méthylène (NF EN 933-9+A1) et de l'équivalent de sable (NF EN 933-8+A1).

Tableau 3-3 Valeurs de bleu méthylène et de l'équivalent de sable des granulats.

	ESV	Bleu methylene
Sable	70	1,24

3.2.5 Résistance des granulats

Lors de fabrication de béton, le malaxage est la source de frottement intense entre les grains. Si les granulats ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Les essais effectués sont :

- Résistance au choc ; Los Angeles (NF EN 1097-2): l'essai consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1.6 mm. Produits par la fragmentation du granulat testé et qui est soumis aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine de Los Angeles en 500 rotations.

- Résistance à l'usure ; essai Micro Deval «(NF EN 1097-1)» : l'essai consiste à mesurer, dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottement mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation. Tableau 3-4 montre les caractéristiques mécaniques des gravillons 8 /15.

Tableau 3-4 Caractéristiques mécaniques des gravillons 8/15.

Micro Deval	Los Angeles	Gravier
17%	20%	(8/15)

3.3 Ciment

Les ciments utilisés sont de type CEM I/ 42,5 et CEMI 52. Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des ciments utilisés sont établies sur des fiches techniques fournis par les cimentaires. Les résultats de la composition chimique du clinker des deux ciments sont représentés dans le tableau 3-5

Tableau 3-5 Caractéristiques chimiques et physique des ciments utilisés.

Elément	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
CEMI 52.5	63,4	20,5	0,1	1,8	4,4	0,79	0,3	2,3	3,3	3140	/	4200
CEMI 42.5	61,60	20,40	/	1,73	5,53	/	/	3,54	2,29	3100	/	3600

3.4 Additions minérales

Les additions minérales que nous avons utilisées dans notre étude sont caractérisées par une granulométrie inférieure à 80µm. Des fillers calcaires, provenant d'ENG d'El Khroub, noté UF5 et du metakaloin, 1200S (France) dont les principales caractéristiques sont représentées dans le Tableau 3-6.

Tableau 3-6 Composition chimique et physique de fillers calcaire et du metakaolin.

Elément	Cao	Sio ₂	Na ₂ O	Mgo	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
Metakaolin	0,4	55	0,06	0,2	39	0,04	/	/	/	2200	250	190000
Filler calcaire	55,88	0.01	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01	0,0021	2700	1090	4100

3.5 Les adjuvants (super plastifiant)

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau. Ils sont incorporés aux bétons à des doses inférieures ou égales à 5% du poids de ciment. Dans notre étude nous avons utilisé le Superplastifiant de marque BSAF, Glenium 26 et 27 (haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C et un long maintien d'ouvrabilité). Les Glenium 26 et 27 se différencient des autres adjuvants à base d'éthers poly carboxyliques, par leur structure spécifique qui leur confère un fonctionnement particulier avec le ciment. La cinétique d'absorption sur les grains du ciment est différente, permettant ainsi un meilleur déroulement des premières réactions d'hydratation (dissolution, formation, d'ettringite, dispersion). Certaines caractéristiques de Glenium 26 et 27 sont présentées dans l'annexe.

3.6 Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente les laboratoires : de génie civil de l'université de Constantine 1 et L2MGC à l'université de Cergy-Pontoise.

3.7 Fibres

3.7.1 Propriétés des fibres

3.7.1.1 Définition

Les différentes fibres végétales utilisées dans cette étude sont : Alfa, Dis, Palmier dattier, Chanvre et Chènevotte. Ces fibres ont été utilisées avec une longueur d'environ 2 cm pour les BAP et 1,5 cm pour les mortiers. Sur la figure 3-2, sont présentées les différentes fibres végétales utilisées avec leurs observations microstructurales à l'aide d'un microscope électronique à balayage. La fibre de polypropylène a été utilisée avec une longueur de 1,2 cm. Le tableau 3-7 présente les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des fibres végétales et polypropylène.

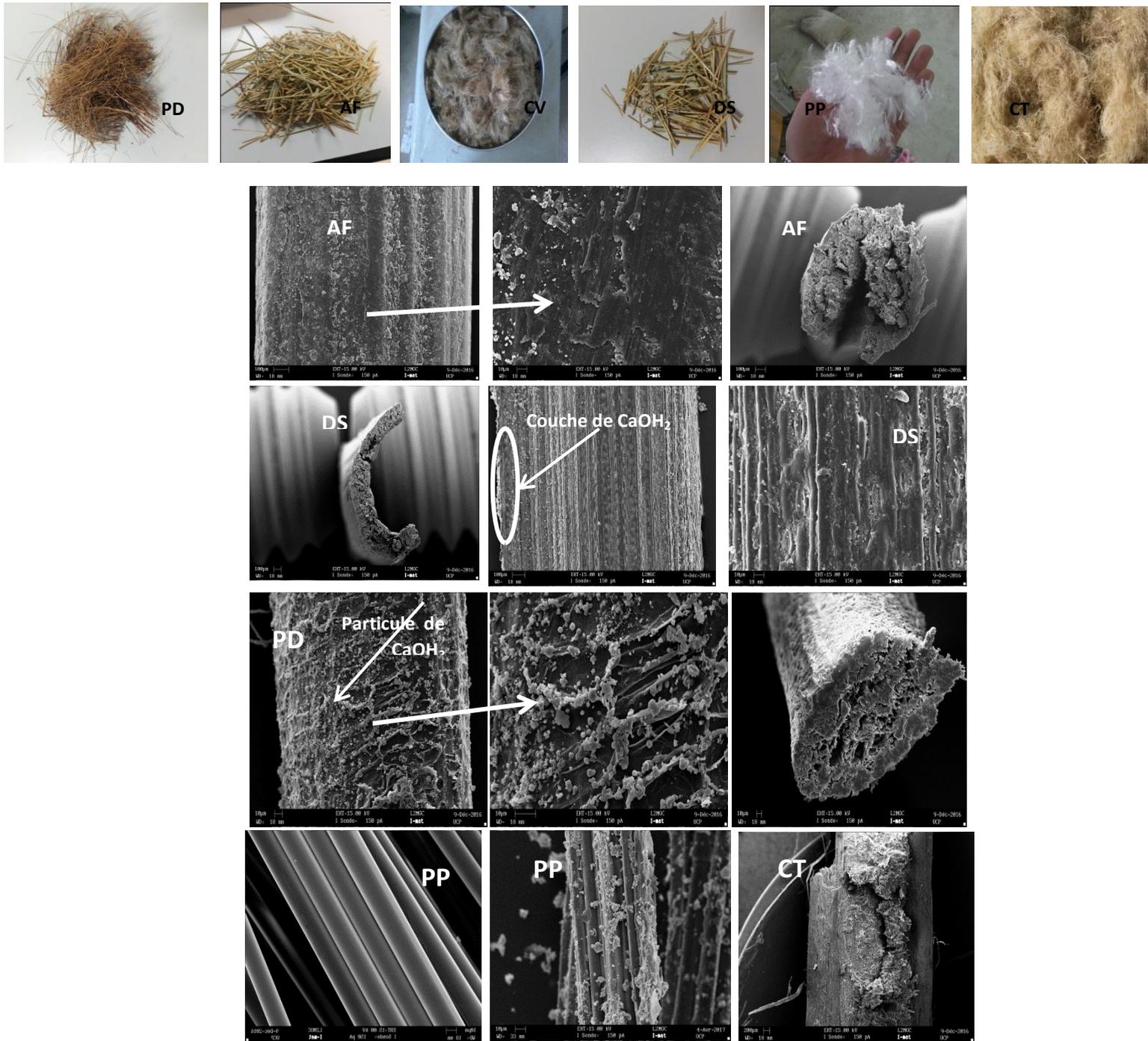


Figure 3-2 Différentes fibres utilisées.

Tableau 3-7 Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des fibres végétales et polypropylène.

Nature de la fibre	Alfa	Dis	Palmier dattier	Polypropylenes	Chanvre	Chènevotte
Densité absolue (Kg/m ³)	1400	1230	1383,3	900	1580	134.8
Résistance à la traction (MPa)	248,49	173,53	375,33	450	619,25	/
Déformation maximale (mm)	0,705	0,433	1,178	/	0,682	2 à 5
Absorption d'eau (%)	100	90- 88	132,5	/	158	/
Diamètre µm	883,07	900-2480	204,8-450	24,5	110	/
Longueur cm	1,5	1,5	1,5	1,2	1,5	/

3.7.1.2 Résistance à la traction

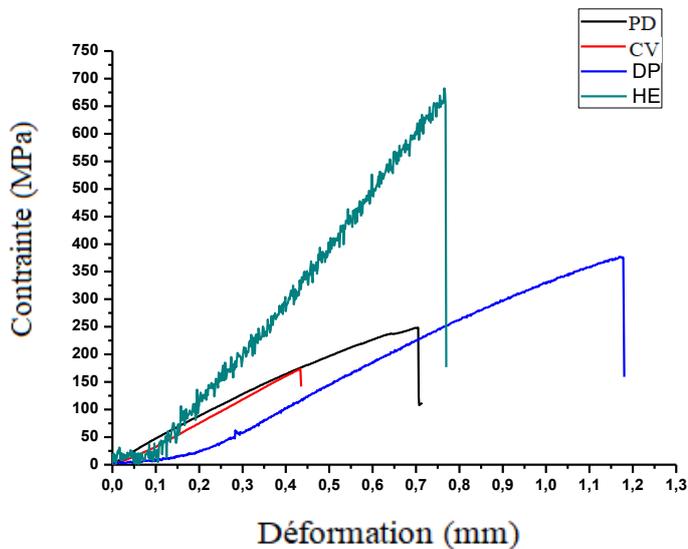


Figure 3-3 Résistance à la traction des différentes fibres végétales utilisées.

A partir de la figure 3-3 on remarque que la fibre de chanvre possède une résistance plus élevée que les autres fibres. Toutes les fibres donnent des résistances à la traction élevées qui varient entre 173 et 619 MPa. Ainsi on peut constater que la déformation maximale des fibres change suivant la nature comme le montre le tableau 3-7. La flexibilité et la capacité de déformation de ces fibres jouent un rôle important pour l'amélioration de la capacité d'absorption d'énergie dans les cas de défaillance.

3.7.1.3 Analyse thermogravimétrique (ATG) des fibres végétales

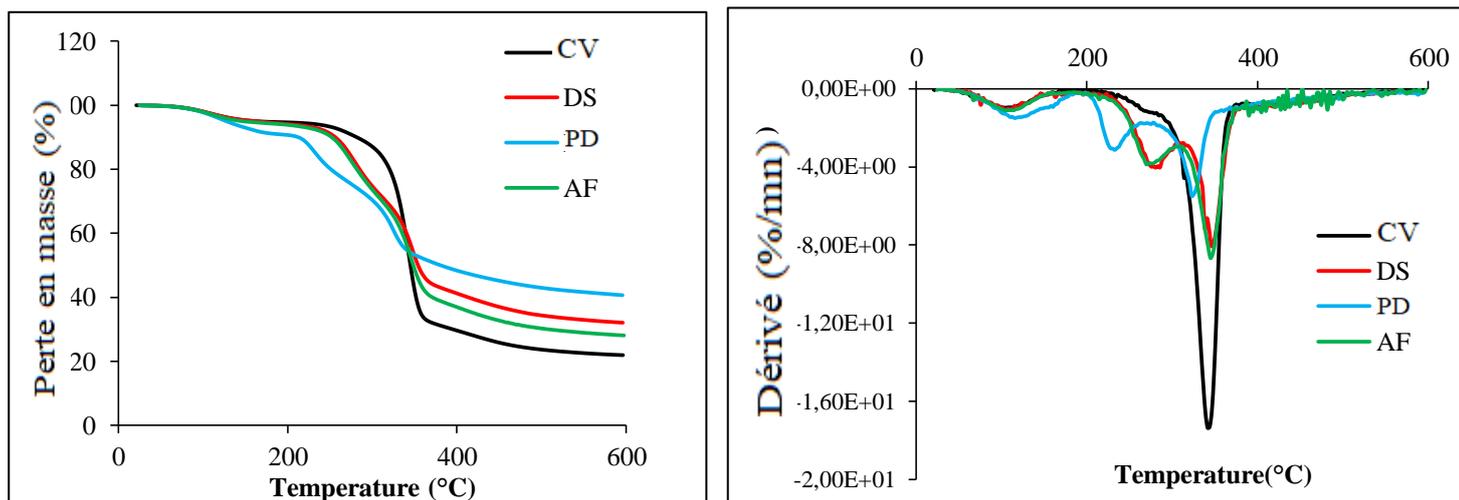


Figure 3-4 Analyse thermogravimétrique et sa dérivée sur les fibres végétales (Dis (DS), alfa (AF), palmier dattier(PD) chanvre (CV)).

D'après la figure 3-4 on constate qu'entre 20-100°C il y a une légère perte de poids en raison de l'évaporation de l'humidité contenue dans les fibres (Wei et Meyer 2015). M. Benítez-Guerrero et al (Sedan, Pagnoux et al. 2007) ont montré qu'il y a une perte de masse de 4% de cellulose, 7% à 9% de lignine et xylane de la fibre végétale. Dans cette plage de températures, une diminution importante de cristallinité est observée pour ces fibres.

A une température comprise entre 100 et 350°C selon J. Wei and C. Meyer (Wei et Meyer 2015) ont montré que la perte du poids des fibres naturelles est due à décomposition de l'hémicellulose et de la partie principale de la lignine.

Par ailleurs M. Benítez-Guerrero et al (Benítez-Guerrero, et al. 2014) ont expliqué qu'à 200°C les fibres végétales subissent la dépolymérisation, la décomposition et le réarrangement des éléments amorphe, impliquant une perte de masse importante variant entre 17 à 21%.

Entre 260-490°C la perte de poids des fibres est maximale et accompagnée d'une dégradation de la cellulose(Wei et Meyer 2015). Cette étape présente une perte de masse des fibres de 50 à 60%. La fibre de chanvre présente le plus grand pic. Ceci à cause de la grande quantité de cellulose qui existe dans cette fibre. Entre 490 et 600 °C la perte de masse continue à diminuer. Cela est dû à la décomposition thermique de la cellulose et de la lignine résiduelle de la fibre (Wei et Meyer 2015). M. Benítez-Guerrero et al (Benítez-Guerrero, López-Beceiro et al. 2014) ont constaté que la petite perte de masse soutenue et observée dans une atmosphère inerte, correspond au procédé de carbonisation des fibres. Le résidu mesuré à 600 °C pour les fibres naturelles est entre 30 et 40%. Pour les fibres de Dis et Alfa, on constate un comportement quasiment similaire à cause de la quasi-ressemblance au niveau de la composition chimique.

3.7.1.4 Analyse des fibres par infrarouge

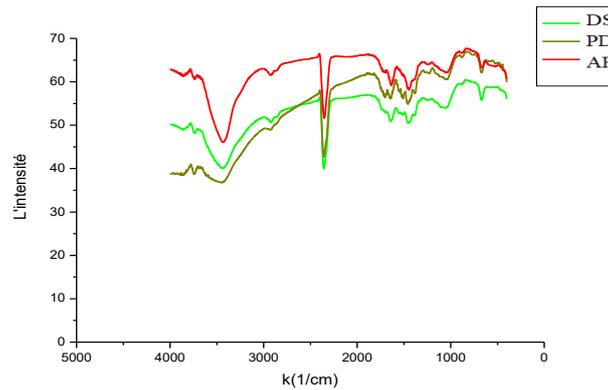


Figure 3-5 Spectres IFTR les trois fibres (Alfa, Palmier dattier, Dis).

Pour déterminer l'ensemble des changements de la structure causé par les diverses nature des fibres, on a effectué une analyse par l'infrarouge (IFTR).

On observe sur la figure 3-5 une large bande à 3500 cm^{-1} . Elle est due principalement aux groupements OH existants dans la structure des fibres (Xiao et Falkner 2006) (Mwaikambo et Ansell 2002) (Dai et Fan 2010). On remarque que l'amplitude de ce pic (3500 cm^{-1}) pour les fibres d'Alfa est la plus importante. Ce qui confirme que ces fibres contiennent beaucoup de liaisons OH, d'où la matière cellulosique est plus élevée (Behnood et Ghandehari 2009). Les bandes à environ 2850 cm^{-1} et 2920 cm^{-1} correspondent successivement aux graisses et aux polysaccharides. Les trois fibres présentent des pics identiques. Ceci a été également par (Topçu et Uygunoğlu 2010). Le nombre d'ondes 2350 cm^{-1} correspond aux vibrations des chaînes aliphatiques C-H. Le palmier dattier et le Dis présentent des pics similaire. On note également la présence d'une bande à 1050 cm^{-1} , et une seconde à 1630 cm^{-1} ce qui traduit l'existence des liaisons simples C—O et doubles C=O, qui indiquent la présence de pectines, hémicelluloses et lignine (Topçu et Uygunoğlu 2010). Les bandes entre $1650\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$ liées à la présence de l'aldéhyde, carboxyle et ester groupant leur présence dans les structures de la lignine et l'hémicellulose. Selon A. A. Behnood and M. Ghandehari (Behnood et Ghandehari 2009) les bandes entre 1510 cm^{-1} et 1450 cm^{-1} signifient des pics de lignine dans les fibres. Les pectines se trouvent autour de 1730 cm^{-1} où l'intensité des spectres est plus ou moins identique. Entre 1450 cm^{-1} et 1000 cm^{-1} se trouvent d'autres pics de cellulose.

3.7.1.5 Traitement des fibres

Concernant les BAP les fibres sont utilisées sans traitement. Par contre pour les mortiers toutes les fibres végétales sauf la chènevotte ont été mises dans une solution d'hydroxyde de calcium (à 0,73% de concentration) pendant une heure à une température de 20°C . Elles étaient, ensuite séchées dans une étude ventilée à 45°C . La période d'immersion des fibres végétales allant de 30 à 60 min, avec des concentrations d'alcalins faibles (0,5-1%) ne provoquent pas la dégradation des fibres (Tonoli, G et al 2009).



Figure 3-6 Fibre végétales traitées.

3.8 Formulation

3.8.1 Formulation des BAP

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde, (approches japonaise, suédoise, et approche du LCPC...etc.). Dans notre étude nous utiliserons la méthode de LCPC (BETONLAB pro) (De Larrard et Sedran 1999).

3.8.1.1 Méthode de formulation LCPC (BETONLAB pro)

Cette approche française a été développée dans le laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Sedran et De Larrard (1999) (De Larrard et Sedran 1999) ont utilisé un modèle de «suspension solide». Ce modèle peut prédire la teneur en vide entre les granulats (la compacité) visant à optimiser le squelette granulaire et minimiser la quantité d'eau dans les BAP. Le concept de «viscosité relative» est utilisé pour évaluer l'état de l'empilement granulaire des matériaux constitutifs et à obtenir une optimisation de la distribution des granulats. Cette méthode a permis de réduire les essais sur béton. Toutefois, il faut un certain nombre d'essais préliminaires (la compacité..etc). Dans l'organigramme suivant nous donnons les principales équations utilisées dans cette méthode. La figure 3-7 récapitule les étapes principales de l'approche LCPC.

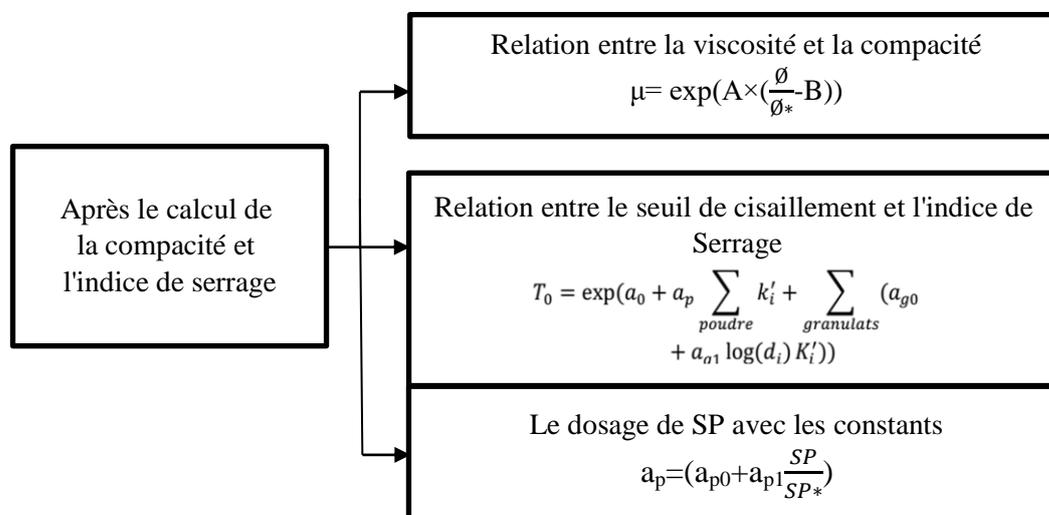


Figure 3-7 Organigramme de formulation betonlab pro (De Larrard et Sedran 1999)

Gâchée n°	15	16	17	18	19	20	21
G1 (kg/m ³)	654,4	649,3	648,9	649	649,1	651	648,8
G2 (kg/m ³)	170,8	169,5	169,4	169,4	169,4	169,9	161,3
S1 (kg/m ³)	803,6	797,4	796,9	797	797,1	799,5	804,8
C1 (kg/m ³)	400	400	400	400	400	400	400
FCalc1 (kg/m ³)	120	120	120	120	120	115	120
SP1 (kg/m ³)	9	9	9,5	9,4	9,3	9,3	9,3
Eau (kg/m ³)	194,9	199,9	199,6	199,6	199,7	199,7	199,7
G1 (%)	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5
G2 (%)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10
S1 (%)	50	50	50	50	50	50	50,5
Taux de saturation (%)	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Taux de superplastifiant (%)	0,9	0,9	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93
Eau eff	195	200	200	200	200	200	200
Air total (%)	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
AEA	Non						
Rapport G/S	1,027	1,027	1,027	1,027	1,027	1,027	1,007
Eeff/C	0,488	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Environnement	>0	>0	>0	>0	>0	>0	>0
C + kA	400	400	400	400	400	400	400
Eeff / (C + kA)	0,488	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Densité	2,353	2,345	2,344	2,344	2,345	2,344	2,344
Affaissement (cm)	27,3	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
fc7 (MPa)	31,5	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
fc28 (MPa)	45,9	44,2	44,1	44,2	44,2	44,2	44,2
Retrait total (10-6)	1171	1208	1211	1210	1210	1201	1216
Indice de serrage du béton non confiné	5,905	5,703	5,699	5,7	5,7	5,686	5,704
Prix	88,77	88,62	89,35	89,21	89,06	88,96	89,05

Figure 3-8 Interface de Bétonlab pro.

3.8.1.2 La composition retenue

Le tableau 3-8 présente les proportions de mélange des BAP développés dans cette étude.

les quantités (kg/m ³)	BAP-T	BAP-PP	BAP-AF	BAP-DS	BAP-PD	BAP-CV	BAP-CT
Ciment	400	400	400	400	400	400	400
Fillere calcaire	120	120	120	120	120	120	120
Sable	804,8	804,8	804,8	804,8	804,8	804,8	804,8
Gravier (3/8)	161,3	161,3	161,3	161,3	161,3	161,3	161,3
Gravier (8/15)	648,8	646,8	646,8	646,8	646,8	646,8	646,8
Eau	203,2	220,2	206,5	205,54	206,5	217,2	207,7
Superplastifiant	9,5	10,11	9,8	10,1	10,1	9,86	9,68
Fibres	/	2	2	2	2	2	2

Tableau 3-8 Composition de différents mélanges de BAP utilisés.

Sachant que BAP-T : sans fibre ; BAP-PP : avec fibre de polypropylène ; BAP-AF : avec fibre d'alfa ; BAP-DS : avec fibre de Dis ; BAP-PD : avec fibre de palmier dattier ; BAP-CV : avec fibre de chanvre ; BAP-CT : avec fibre de chènevotte.

On constate dans le tableau 3-8 que l'ajustement d'eau et de superplastifiant est différent d'une fibre à une autre particulièrement dans les BAP-CV et les BAP-PP. Ceci est dû probablement

à la flexibilité et le diamètre de ces fibres qui provoquent un empêchement de l'écoulement des granulats.

3.8.2 Formulation des mortiers

Au total, six formulations ont été préparées, avec la même teneur de fibre de 0,1% par rapport au volume total. Ce dosage est recommandé par plusieurs travaux de recherche pour d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques.

Le dosage en liant (Ciment + Metakaolin) est fixé à 450 kg/m³ est utilisé avec le même squelette granulaire, la teneur en eau et le superplastifiant. Les détails de la composition des mélanges sont résumés dans le tableau 3-9.

Tableau 3-9 présente composition des mortiers utilisés dans cette étude.

Tableau 3-9 Composition des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (kg/m ³)	MT	MPP	MAF	MDS	MPD	MOCV
Ciment	315	315	315	315	315	315
Métakaolin	135	135	135	135	135	135
Sable	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Eau	250	250	250	250	250	250
Superplastifiant	6	6	6	6	6	6
Fibre	/	0,91	1,4	1,2	1,25	1,35

MT : mortier témoin (sans fibre), MPP : mortier avec des fibres de polypropylène, MAF : mortier avec des fibres d'alfa, MDS : mortier avec des fibres de Dis, MPD : mortier avec des fibres de palmier dattier, MCV : mortier avec des fibres de chanvre.

3.9 Essais de caractérisations

3.9.1 Essais de caractérisations des BAP

3.9.1.1 Caractérisation à l'état frais

Afin de qualifier notre BAP nous avons procédé aux essais suivants : essai d'étalement, essai de la boîte en L, essai du V-funnel, le J ring, l'air occlus et la stabilité au tamis. Les résultats de ces tests sont donnés dans le tableau 3-10.

Tableau 3-10 Caractéristiques à l'état frais des bétons autoplaçants.

Les essais	BAP-T	BAP-PP	BAP-AF	BAP-DS	BAP-PD	BAP-CV	BAP-CT
Etalement (cm)	73	60,5	68	71,5	69,25	60	71,75
T50 (s)	2,3	3,5	3,9	3,8	3,6	3,1	2,9
J ring	0,15	5,05	1,7	1,43	1,61	1,8	1
DJ (cm)	71,5	49	62	65,4	64	53	68
Vf unele (s)	10,73	8,44	11,98	16,3	13,88	9,39	10,47
Boite-L	0,91	0,45	0,84	0,75	0,83	0,80	0,9
Stabilité au tamis	15,4	4,043	5,412	7,87	6,13	2,48	13,88
Air occlus (%)	1,9	1,80	2,0	1,95	1,8	2,1	1,85
Densité (t/m ³)	2,34	2,31	2,36	2,37	2,39	2,32	2,33

En comparant les résultats présentés dans le tableau 3-10 avec les critères exigés pour un BAP, on peut voir que tous les mélanges présentent des propriétés satisfaisantes à l'état frais. La teneur en fibres que l'on a choisi a provoqué un léger effet négatif sur la maniabilité et sur quelques caractéristiques autoplaçantes. Pour les fibres de polypropylène et les fibres de chanvre le diamètre de l'étalement a été réduit de 73 à 60 cm. En outre, les autres caractéristiques comme le J-ring et le V-funnel ont augmenté, mais restent dans les fourchettes requises pour un béton autoplaçant. A la différence, les BAP avec les fibres de polypropylène donnent quelques valeurs en dehors des valeurs limites d'un autoplaçant surtout pour la boîte en L et le J-ring. Ceci est dû au dosage élevé de ces fibres. Pour la stabilité au tamis on constate que l'introduction des fibres de chanvre, Dis, palmier dattier, alfa et polypropylène réduit considérablement la ségrégation statique des BAP d'environ 20%. Cette réduction est dû essentiellement à l'absorption élevée d'eau par ces fibres jouant un rôle de l'agent de viscosité (El Hilali 2009). Pour la densité humide et l'air occlus on remarque que les BAP avec les fibres végétales donnent des valeurs similaires que celles du BAP témoin.

On conclut que le phénomène de l'absorption d'eau par les fibres végétales joue un rôle prépondérant pour les caractéristiques rhéologiques des BAP fibrés. La teneur en fibres, leur longueur spécifique et leur nature influent sur l'aspect de la capacité de remplissage, la fluidité et la maniabilité des bétons autoplaçants. Les fibres de Dis, d'alfa, de palmier dattier et de chènevotte donnent un bon comportement des BAP à l'état frais se rapprochant du béton témoin. Ces résultats confirment que l'on peut confectionner des BAP renforcés de fibres végétales.

3.9.1.2 *Caractérisation à l'état durci*

Les essais sur béton durci visent à vérifier des propriétés du matériau en place.

❖ Essai de compression

Les essais de compression simple sont réalisés à 3, 7, 14, 28 et 90 jours par un écrasement des éprouvettes de bétons cylindriques $10 \times 20 \text{ cm}^2$, sous une presse de type CONTROLS. Les faces d'appui des éprouvettes sont rectifiées au lapidaire pour acquérir une planéité de la surface et éviter la dissymétrie lors de l'essai de compression.



Figure 3-9 Appareil d'essai de la résistance à la compression.

❖ Essai de flexion

Les essais de la flexion trois points sont réalisés à 3, 7, 14, 28 et 90 jours de durcissement du béton sur des éprouvettes prismatique $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Les essais sont effectués avec une presse hydraulique de type CONTROLS selon la norme (NF EN 12390-5)

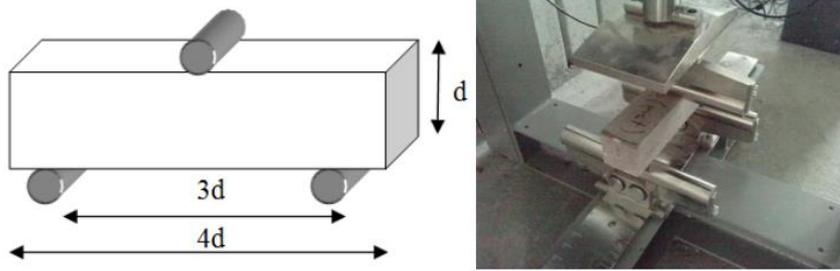


Figure 3-10 Dispositif de flexion.

❖ Détermination de module de Young (E) (NF EN 1352)

L'essai de caractérisation de module d'élasticité est un essai pour vérifier le comportement du matériau sous chargement.

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- ✓ Un élastomère contient deux capteurs de déplacement.
- ✓ Une presse d'une capacité maximale de 3000KN.

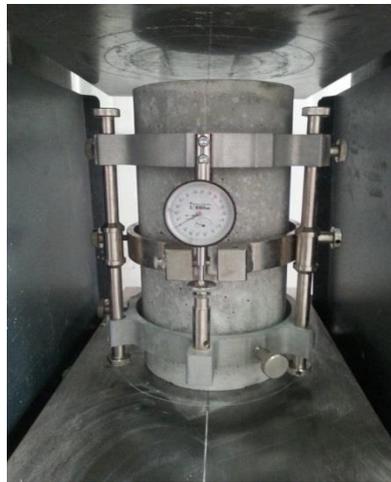


Figure 3-11Appareil de module d'élasticité.

❖ Variations dimensionnelle et pondérale

Pour chaque béton, les mesures de gonflement et perte en masse sont effectuées longitudinalement sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un refractomètre (précision $\pm 0,001 \text{ mm}$) voir la figure 3-12. Les éprouvettes sont conservées dans deux environnements différents : dans l'eau à une température de $22 \pm 2^\circ \text{C}$ et à l'air libre à une température de $22 \pm 2^\circ \text{C}$ et une humidité relative de $55 \% \pm 5 \%$.



Figure 3-12 Mesure de variation dimensionnelle.

La formule de retrait s'interprète par la variation relative de longueur. Elle est généralement désignée par ε et calculée comme suite :

$$\varepsilon(t) = \frac{l(t) - l(t_0)}{l}$$

Où

l : la longueur de la tige étalon $l = 280$ mm.

$l(t)$: la longueur de l'éprouvette au temps t

$l(t_0)$: la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisie pour origine. En général cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24 h après la confection des éprouvettes.

❖ Fluage

Les essais de flexion reliant au fluage ont été effectués sur les éprouvettes d'une section carrée $10 \times 10 \text{ cm}^2$, et d'une longueur de 120 cm, la distance entre appuis est 100 cm.

Nous avons opté pour un essai de flexion quatre points suivant le descriptif de la figure 3-13. Ce type de chargement permet d'éliminer toute contrainte de cisaillement dans la partie centrale. On y conserve un moment fléchissant constant. De plus, la flexion quatre points donne des résultats moins dispersés que la flexion trois points.

Les poutrelles ont été coulées dans des moules prismatiques de dimensions $10 \times 10 \times 120 \text{ cm}^3$. Après démoulage, la moitié des poutrelles, préalablement rectifiées, sont totalement scellées par trois couches de papier aluminium adhésif pour déterminer le fluage endogène. Le reste des éprouvettes ne sont pas protégées servent à déterminer le fluage total. Ensuite, elles sont entreposées dans une salle dont la température est maintenue à $(20 \pm 1^\circ\text{C})$, et l'humidité relative à $(55 \pm 5\%)$. Pour chaque mélange on déterminera la charge de rupture à 7 jours, sous une sollicitation monotone de flexion quatre points, voir le dispositif de la figure 3-13.

Le test de fluage en flexion a été conçu et développé en 1993 dans le cadre d'un projet de thèse de doctorat de H.Houari (Houari 1993) qui a construit un bâti avec un système de chargement manuel. Cette mise en charge est réalisée à l'aide d'un support. Ce dernier prend appui sur la partie supérieure du bâti par l'intermédiaire d'une barre rigide de répartition d'effort. Les poutrelles sont placées sur le bâti pour être soumises à une flexion « quatre points ». On transmet par le biais de rouleaux fixés sur la barre, deux efforts égaux. La

poutrelle repose sur deux appuis simples. Les appuis sont constitués de deux rotules composées de rouleaux en acier, dont l'un est translatable pour éviter la mise en jeu d'un effort normal parasite.

Pour les éprouvettes de fluage total et le fluage propre, on utilise la méthode courante de la mesure de la flèche à mi-portée de la poutrelle. C'est la mesure du déplacement du côté de la face en traction (fibres tendues) effectuée à l'aide d'un comparateur de précision 1/1000^{ème} 0,001 mm. La mesure de la flèche se fait au milieu de la poutrelle à 50 cm de l'appui. Le chargement a été imposé après 7 jours de cure à l'air ambiant. Une charge constante de 140 kg équivalente à 45% de la charge de rupture est utilisée pour les quatre mélanges. La flèche est mesurée à un intervalle régulier de manière manuelle. Le type de chargement et la salle destinée aux essais sont illustrés sur la figure 3-13.



Figure 3-13 Dispositif du fluage flexionnel (Chabane et Houari 2008)

❖ Comportement vis-à-vis de l'élévation de température

Avant l'exécution de l'essai de température, les échantillons sont conservés dans l'eau durant 14 jours pour limiter les effets de la dépression capillaire en saturant la porosité. Ensuite, ils sont exposés à l'air pendant 90 jours. Pour le cycle d'échauffement, quatre températures de 150°C, 300°C, 450°C et 600°C ont été utilisées. Cela est divisé en trois phases: La première phase se compose d'une rampe de montée en température avec une vitesse de 1°C/min (Recommandation de la Rilem 1995). La 2^{ème} phase (palier), la température est stabilisée dans le four durant une heure. La dernière (la descente) est une rampe de refroidissement jusqu'à la température ambiante. Les essais de la résistance à la compression résiduelle (après le chauffage), la perte en poids et la vitesse d'impulsion ont été effectués sur des cubes de (10x10x10 cm³); et la résistance à la flexion résiduelle sur des prismes de 7x7x28 cm³. Les mesures de vitesse d'impulsion ont été effectuées selon la norme (ASTM C-597-09).



Figure 3-14 Four à moufle (1200 C°)

❖ Attaque sulfatique

Nous avons adopté la méthode de la norme (ASTM C 1012) pour laquelle les spécimens sont entièrement immergés dans la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4). La procédure d'essai a été effectuée en immergeant des échantillons de béton après 28 jours de cure dans 2 bacs: un bac rempli d'eau de robinet (milieu de référence) et un bac rempli d'eau contenant 5% de concentration de (Na_2SO_4). La température de la solution a été maintenue à 22 ± 2 °C. Comme ce phénomène prend une longue durée pour avoir l'agressivité, nous avons choisi une procédure pour accélérer le mécanisme de l'attaque des sulfates basée sur le cycle de séchage-mouillage représentée sur la figure 3-15:

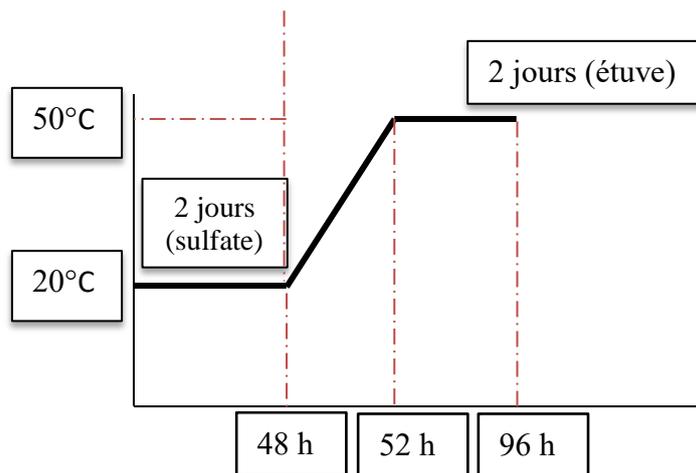


Figure 3-15 Cycle séchage-mouillage avec l'attaque sulfatique.



Figure 3-16 Bacs de conservation dans la solution (Na_2SO_4)

❖ Porosité capillaire

Le transfert de liquide dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface dans les capillaires, est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec par remontée capillaire (absorptivité) dépend de la porosité ouverte et des réseaux poreux du béton (Makani 2011). L'objectif de cet essai est donc de suivre la masse d'eau absorbée par des BAP fibrés au cours du temps pour mettre en évidence d'éventuelle différence de porosité ouverte de nos bétons. Selon le règlement, (NF P 18-404) un test pour déterminer l'absorption d'eau par la capillarité peut également être effectué à 90 jours. Pour chaque mélange, deux éprouvettes cubiques ont été préparées. Les coefficients de capillarité ont été déterminés en utilisant des échantillons préconditionnés et séchés dans une étuve à environ $105 \pm 5^\circ \text{C}$. L'échantillon d'essai a été exposé à l'eau à travers un plan de coupe ($100 \times 100 \text{ mm}^2$) en le plaçant dans un moule. Le niveau d'eau dans la cuve est maintenu à environ 5 mm au-dessus du fond de l'éprouvette. Les surfaces de l'échantillon en dessous du niveau de l'eau ont été protégées par un papier aluminium autocollant pour obtenir un écoulement unidirectionnel. Les valeurs du coefficient d'absorption capillaire sont calculées pour les échéances suivantes : 0,25; 0,5, 1, 2, 4, 8 et 24 heures. Le coefficient d'absorption capillaire (C), exprimé en (kg/m^3) est calculé par l'intermédiaire de la relation suivante:

$$c = \frac{M_0 - M_i}{A}$$

M_i , M_0 , A sont la masse initiale, la masse mesurée suivant le temps, la surface en contact avec l'eau en mm^2 respectivement.



Figure 3-17 Essais d'absorption capillaire

3.9.2 Essais de caractérisation des mortiers

3.9.2.1 Préparation des échantillons

Le schéma suivant montre les principales procédures utilisées pour confectionner différents mortiers.

Mode de conservation (eau, air) et les types d'éprouvettes :
4x4x16cm³
15x30cm²
5x10cm²



Méthode de malaxage :
- 2 minutes tous les constituants anhydre
- 1 minute avec les fibres
- 1 minute avec 75% l'eau
- 3 minutes avec 25% l'eau+Sp



Figure 3-18 Méthode de malaxage et le mode de conservation.

3.9.2.2 Résistance à la compression et à la flexion

Tous les échantillons ont été démoulés 24 h après leur coulage et conservés dans l'eau à une température de 20°C±1°C. Les échéances de la caractérisation mécanique (résistance à la compression et à la flexion) pour tous les types de mortier sont 7, 28 jours.

Pour chaque mélange, des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ ont été utilisées pour déterminer la résistance à la flexion, et des demis prismes 4x4x4 cm³ pour la détermination de la résistance à la compression.

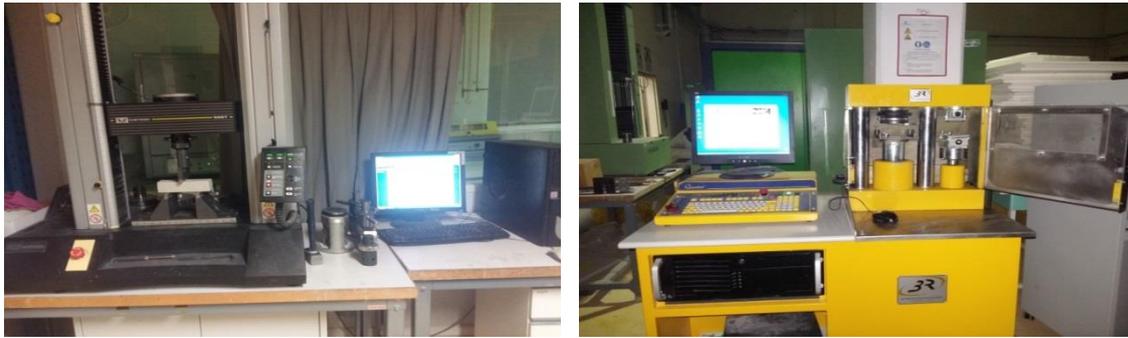


Figure 3-19 Appareils de l'essai de compression et de flexion.

3.9.2.3 Perméabilité au gaz (NF EN 18-463)

La mesure de la perméabilité s'effectue à l'aide d'un perméamétrie CEMBUREAU. Il s'agit d'un appareil à charge constante où le gradient de pression entre l'entrée et la sortie du gaz est maintenu constant au cours du temps. Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 3-20.

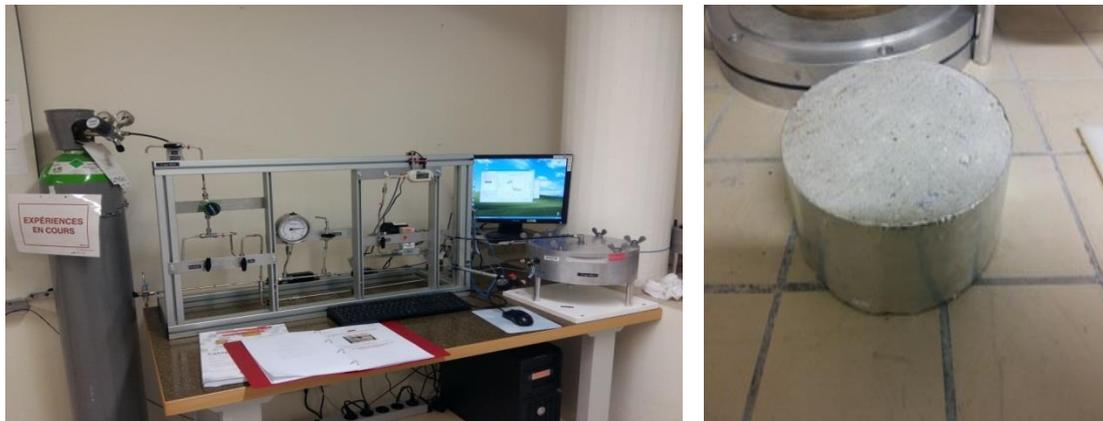


Figure 3-20 Essai de la perméabilité à gaz.

Afin de mesurer cette propriété, des cylindres 15x30 cm² de mortier ont été préparés. Ces cylindres sont découpés en disques de 5 cm d'épaisseur à un âge supérieur à 28 jours. Seuls les échantillons prélevés dans la partie centrale de chaque cylindre sont retenus pour les tests. Ils sont ensuite séchés pendant 2 jours à 105°C dans une étuve, jusqu'à atteindre une masse finale constante, correspondant à un taux de saturation nul. Les échantillons sont sortis de l'étuve puis conservés dans des sacs étanches à 20°C

La périphérie des disques est ensuite couverte d'une bande adhésive en aluminium afin d'assurer l'étanchéité latérale et de rendre le test unidirectionnel. La perméabilité apparente k_a est déterminée d'après la formule suivante :

$$k_a = \frac{2 * \mu * Q * l * P_{atm}}{A(P_1^2 - P_{atm}^2)}$$

Avec μ la viscosité dynamique du diazote N2 [Pa.s],
 Q : le débit volumique du gaz à la sortie [m³/s],
 Patm : la pression atmosphérique [Pa],
 l : l'épaisseur du corps d'épreuve en [m],
 A : la section de l'échantillon en [m²],
 P1 : la pression absolue de gaz à l'entrée en [Pa].

La perméabilité intrinsèque K_{int} est déduite des perméabilités apparentes avec la correction proposée par Klinkenberg :

$$K_a = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_{moy}} \right)$$

Avec β le facteur de Klinkenberg en [Pa], qui dépend du gaz utilisé et P_{moy} la moyenne de la pression absolue d'injection et de la pression absolue de sortie en [Pa]. La perméabilité intrinsèque K_{int} ne dépend que de l'écoulement visqueux, qui agit sur tout le volume contenu dans le capillaire. Dans cette étude, la détermination de la perméabilité intrinsèque avec la correction de Klinkenberg est faite graphiquement en traçant la régression linéaire des points expérimentaux de perméabilité apparente K_a en fonction de l'inverse de la pression moyenne $1/P_{moy}$.

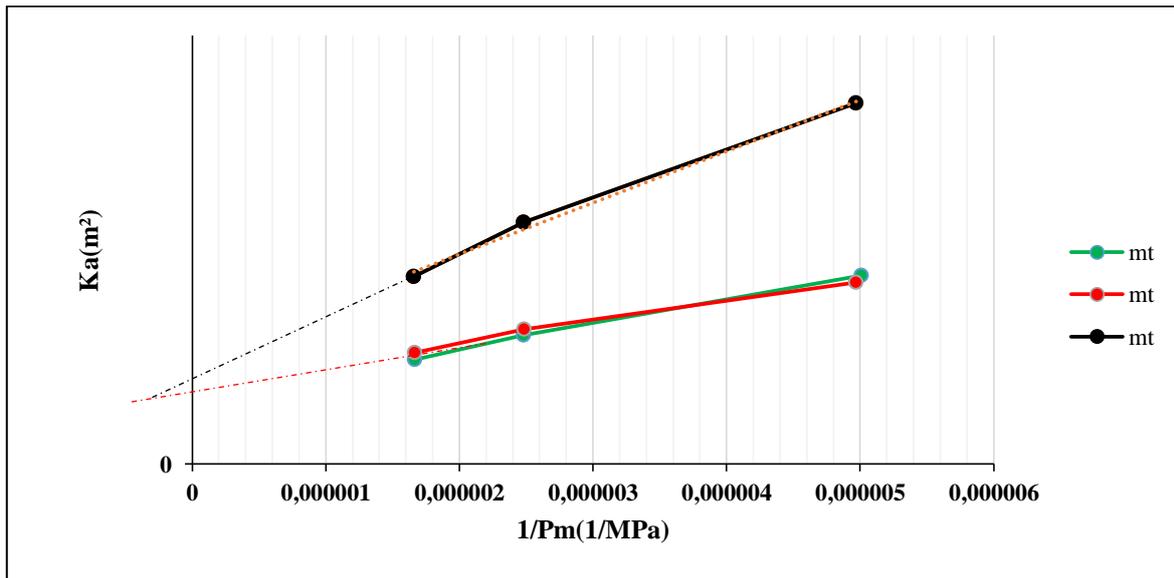


Figure 3-21 Valeurs de la perméabilité apparente.

3.9.2.4 Porosité accessible à l'eau et densité

Cette méthode permet la mesure de la porosité, la masse volumique apparente et la pesée hydrostatique. Le mode opératoire suit la norme (NF EN 18-459). Cette mesure simple, qui fournit la porosité totale du matériau, est considérée comme la base de toute caractérisation microstructurale ou d'évaluation des propriétés de durabilité d'un matériau.

Afin d'assurer la saturation, les éprouvettes testées ont été préalablement séchées dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à la stabilisation de leur masse. Puis elles sont immergées dans l'eau à une température de 20°C.

La masse volumique apparente ρ_d , exprimée en kilogramme par mètre cube, est donnée par l'équation :

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * \rho_{eau}$$

La porosité accessible à l'eau, ε , exprimée en pourcentage volumétrique, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100$$



Figure 3-22 Essai de la porosité à l'eau.

3.9.2.5 La vitesse de l'ultrason:

Des mesures de vitesse d'impulsions ont été effectuées selon la norme (NF EN 12504-4) sur des cylindres de section $5 \times 10 \text{ cm}^2$. Le principe de la mesure consiste à envoyer une impulsion d'onde dans l'éprouvette et on mesure le temps d'exécution de la propagation à travers ce spécimen. L'impulsion est générée par un émetteur et reçue par un récepteur. Connaissant la longueur du trajet et le temps mesuré (Δt) on peut calculer la vitesse d'impulsion (v).



Figure 3-23 Essai de l'ultrason.

3.9.2.6 Carbonatation

La carbonatation des différents mortiers a été réalisée sur des éprouvettes de dimension $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conformément aux recommandations de la norme (XP P18-458). Ainsi, après un préconditionnement pendant 14 jours dans une étuve à $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, les éprouvettes sont introduites dans une enceinte de carbonatation accélérée (figure 3-25). Cette enceinte est réglée à 4% de CO_2 et à une humidité relative $\text{HR} = 65\% \pm 5\%$. Les mesures de l'épaisseur de mortier carbonaté ont été relevées après pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine sur la surface sciée de l'éprouvette prismatique. Les échéances de mesures sont 28, 52 et 90 jours. La solution phénolphtaléine permet de délimiter la zone saine de la zone carbonatée grâce à sa couleur violette.



Figure 3-24 Enceinte de la carbonatation.

3.9.2.7 Cycle gel-dégel (NF P18-425)

Deux essais normalisés relatifs à la résistance du béton à l'action du gel sont recommandés en France. Il s'agit de l'essai de gel dans l'eau et de dégel dans l'eau, défini par sein de la norme (NF P18-424) et connu sous le nom d'essai du gel sévère et de l'essai du gel dans l'air et dégel dans l'eau, défini selon la norme (NF P18-425) et appelé essai du gel modéré. Les essais se composent de 120 cycles au cours desquels la température varie de $9 \pm 3^\circ\text{C}$ à $-18 \pm 2^\circ\text{C}$. La vitesse de descente en température est de $6 \pm 1^\circ\text{C/h}$ tandis que la durée de la montée est supérieure à 45 minutes. Les essais de gel/dégel ont été réalisés dans une chambre froide dont les dimensions sont $3 \times 2.5 \times 1.2 \text{ m}$ équipée d'un système de réfrigération développé par Weiss technik. Des éprouvettes cylindriques et prismatiques ont été fabriquées et conservées dans les moules pendant 24 heures. Après le démoulage, elles sont conservées dans l'eau à température ambiante pendant 90 jours avant d'être soumises aux cycles de gel/dégel dans l'enceinte climatique (Figure 3-25). A la fin de la cure (90 jours), certaines éprouvettes sont immédiatement emballées dans un plastique pour empêcher les échanges d'humidité avec l'extérieur et ont été placées sur des étagères. Les essais à la compression et à la flexion sont effectués sur les spécimens $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ et $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ respectivement. La

conductivité thermique et la vitesse ultrason ont été réalisées sur les éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ et cylindriques $5 \times 10 \text{ cm}^2$.

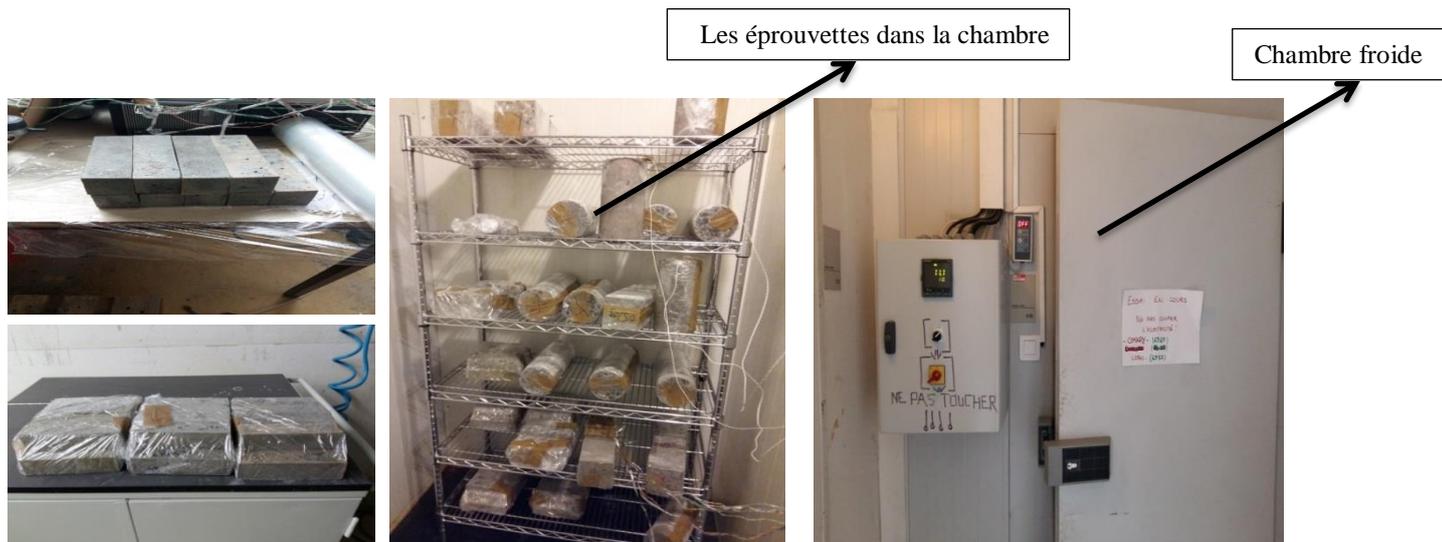


Figure 3-25 Chambre climatique.

3.9.2.8 Conductivité thermique

La conductivité thermique des différents mortiers a été mesurée à l'aide d'un conductimètre du type HOT DISK TPS 1500.

Les essais ont été réalisés à température ambiante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$. La sonde thermique est insérée entre deux éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) (voir figure 3-26). La mesure est prise à 28 jours d'âge.

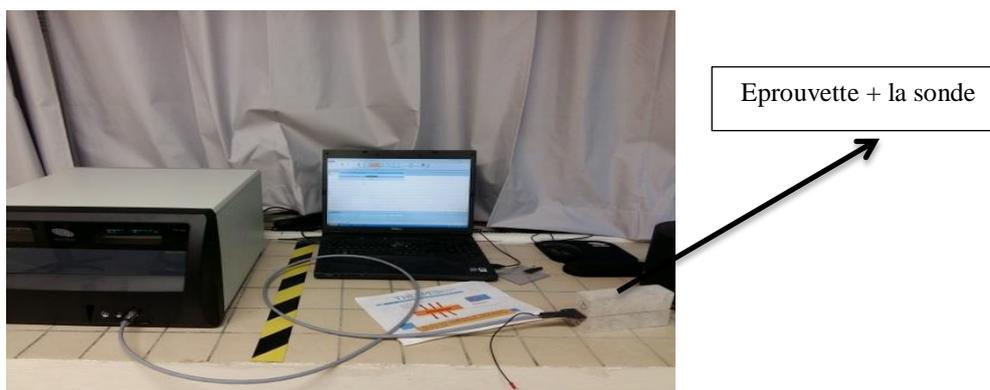


Figure 3-26 Conductivité thermique.

3.9.2.9 Essai de température

Après 28 jours de conservation dans l'eau à 20°C , les éprouvettes de mortier sont exposées à l'air libre jusqu'à 52 jours d'âge. Elles sont, ensuite chauffées à des températures de 150°C , 300°C , 450°C et 600°C . Chaque cycle de chauffage comporte trois phases : La première phase se compose d'une montée en température avec une vitesse de $1^\circ\text{C}/\text{min}$. Cette vitesse est définie par les recommandations du comité technique RILEM TC 129 (Recommandation de la Rilem 1995). La deuxième phase (palier), est le maintien du four à la

température maximale durant une heure. La troisième et dernière phase (la descente) est le refroidissement jusqu'à température ambiante avec une vitesse de 1°C/min.

Les essais de la résistance à la compression résiduelle (après le chauffage), ont été effectués sur des cubes 4x4x4 cm³; et la résistance à la flexion résiduelle sur des prismes de 4x4x16 cm³. Des mesures de vitesse d'impulsions ont été effectuées selon la norme (NF EN 12504-4) sur des cylindres de 5x10 Cm². Pour mesurer la porosité accessible à l'eau et la densité nous avons appliqué la norme française (NF P18-459). L'essai de la conductivité thermique a été réalisé sur trois éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³.

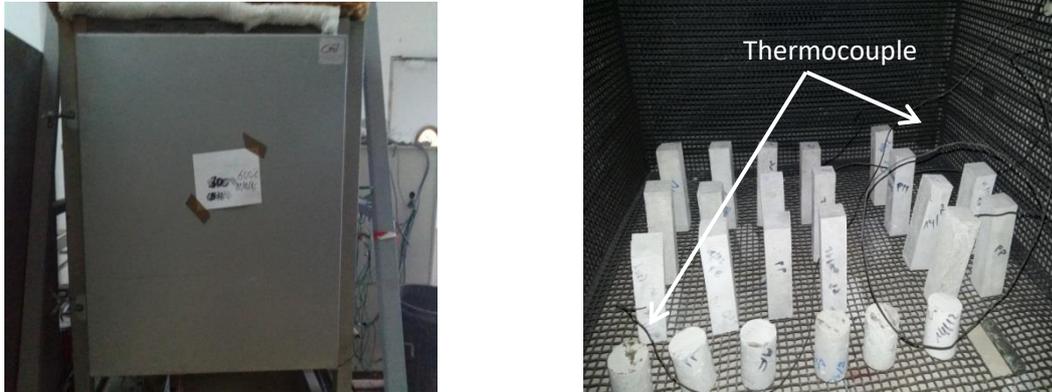


Figure 3-27 Différents spécimens de mortier dans le four.

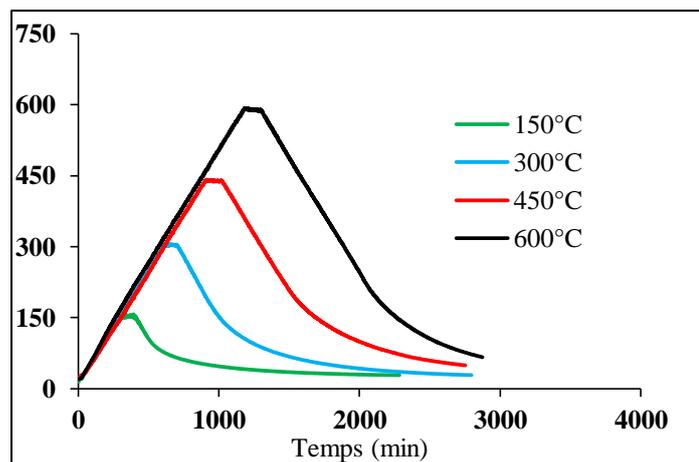


Figure 3-28 Cycle réel de l'échauffement.

3.9.2.10 *Microstructure*

❖ Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage est une technique d'observation de la matière utilisant un faisceau d'électrons après avoir mis sous vide l'échantillon. Les électrons primaires, issus du canon à électron, frappent la surface de l'échantillon ; ils sont diffusés de manière élastique et inélastique, la zone qui est influencée prend la forme d'une poire.

La microscopie électronique à balayage (MEB) a été utilisée pour analyser la morphologie et la microstructure des échantillons de mortier à la température ambiante et élevée.

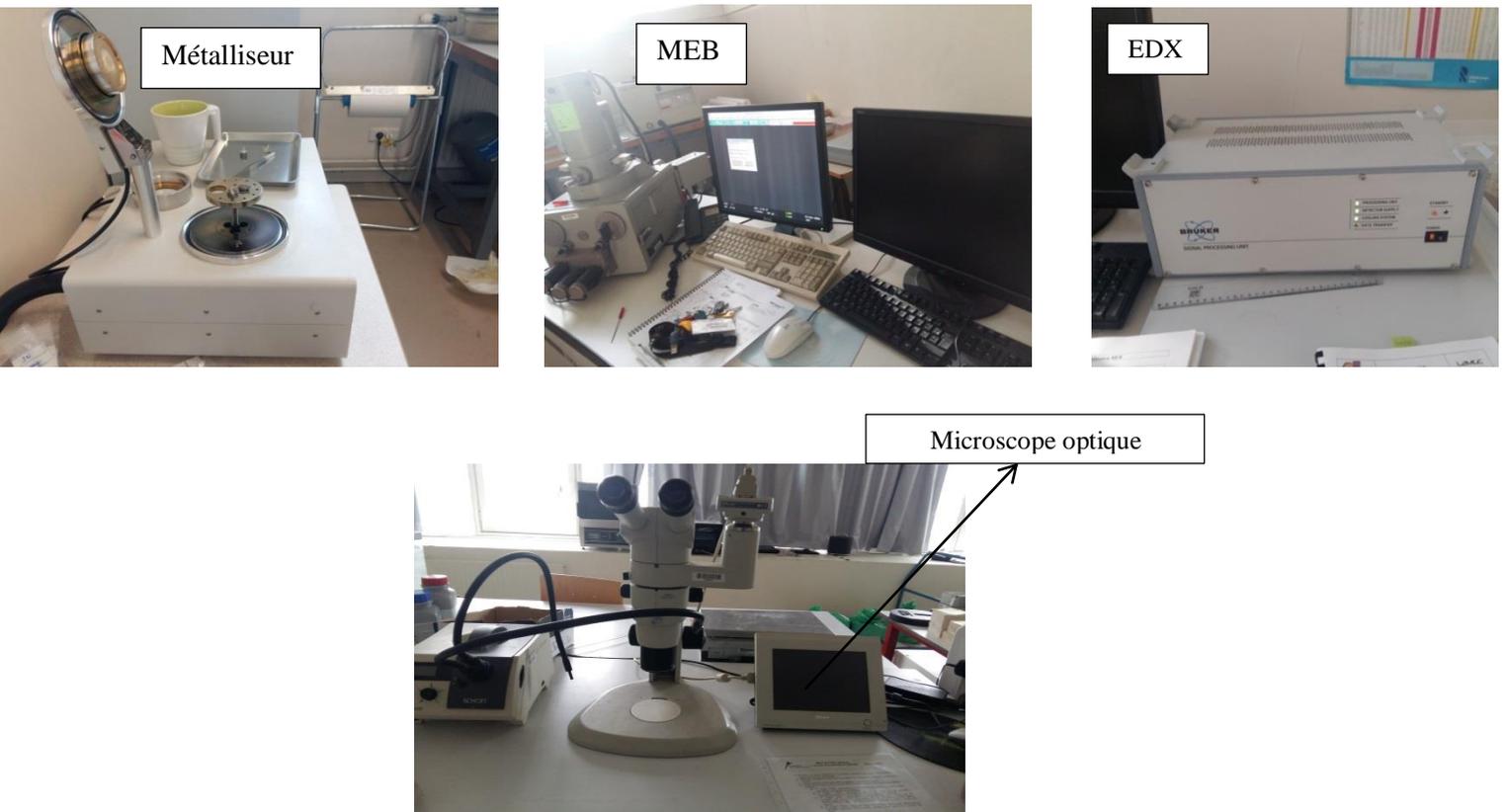


Figure 3-29 MEB et microscope optique.

❖ Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) consiste à mesurer la variation de masse pendant le chauffage. Les échantillons ont été écrasés en poudre. Chaque échantillon a été soumis à un chauffage avec une vitesse de $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ jusqu'à 900°C sous atmosphère d'Argon. La mesure de la dérivée de la courbe thermogravimétrique permet de déterminer la température des changements de phases.



Figure 3-30 Appareil de l'analyse thermogravimétrique.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les essais de caractéristique des matériaux de base des différents mélanges. Les constituants sont conformes aux normes et recommandations pour leur utilisation dans les bétons et les mortiers hydrauliques. Ce qui nous facilite l'adoption d'une approche de formulation adéquate. Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges sous différentes sollicitation.

Chapitre 4

Les propriétés à l'état durci des BAP avec des fibres végétales

4.1 Performances mécaniques

4.1.1 Résistances à la compression et à la flexion

Les résultats de la résistance à la compression et à la flexion des différents mélanges sont représentés dans la figure 4-1.

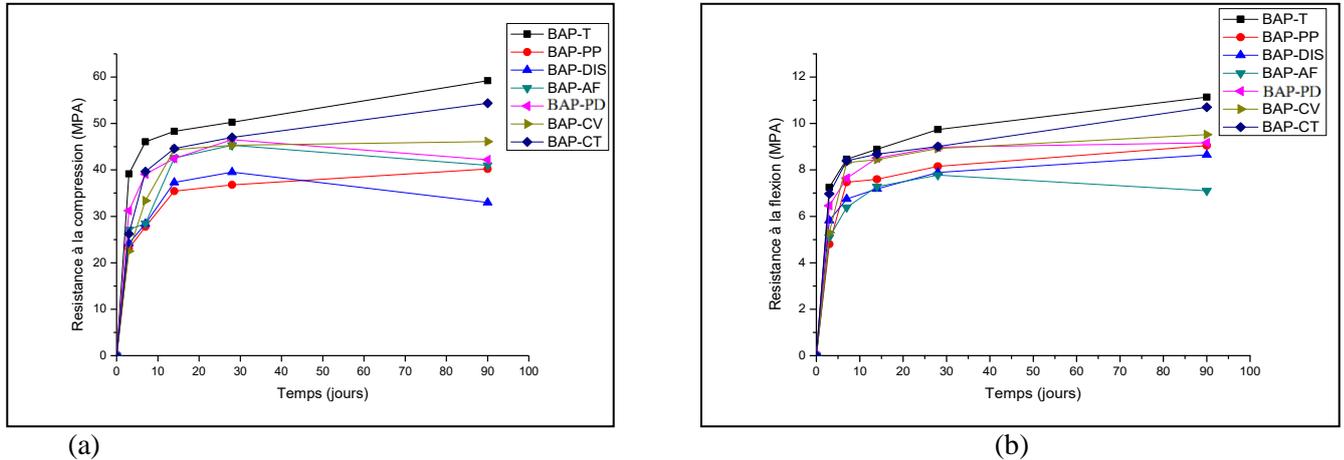


Figure 4-1 Résistance à la compression (a) et à la flexion (b) de différents mélanges.

A partir de la figure 4-1 (a et b) on constate que l'introduction des fibres végétales et synthétiques réduit systématiquement la résistance à la compression et à la flexion.

On remarque aussi que la cinétique de l'évolution de la résistance entre les BAP fibrés (BAP-F) et le BAP témoin (BAP-T) est différente. A titre d'exemple pour la résistance à la compression à 3 jours on constate une différence d'environ de 31 à 42 % entre les BAP fibrés et le témoin. Par contre à 28 jours l'écart est réduit à 14 %. En revanche pour la résistance à la flexion au jeune âge de BAP-T est plus élevée au BAP-F d'environ de 31%. Cependant à 28 jours l'écart est réduit à environ de 7.5% entre les deux types bétons. Ainsi la résistance de BAP-T reste meilleure que celle des BAP-F. Ceci peut être expliqué par l'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire qui provoque une augmentation du volume des vides ainsi une diminution de la compacité du béton.

La variation des résultats entre les BAP fibrés eux même peut s'expliquer par la forme, la taille et la nature des différentes fibres qui influent significativement sur la structure poreuse des bétons.

À 90 jours, on constate que les BAP-DS, BAP-AF, BAP-PD montrent une diminution considérable de la résistance en compression de 17%, 9% et 10% respectivement. Par contre la résistance à la flexion du BAP-AF subit une diminution de 8% à 90 jours. Cette diminution est due principalement à l'utilisation des fibres végétales sans traitement provoquant une dégradation de ces renforts. Les valeurs les plus faibles sont obtenues par les fibres de polypropylène, Dis et Alfa.

4.1.2 Module d'élasticité

La figure 4-2 montre l'évolution de la valeur du module en fonction du temps pour les différents BAP étudiés.

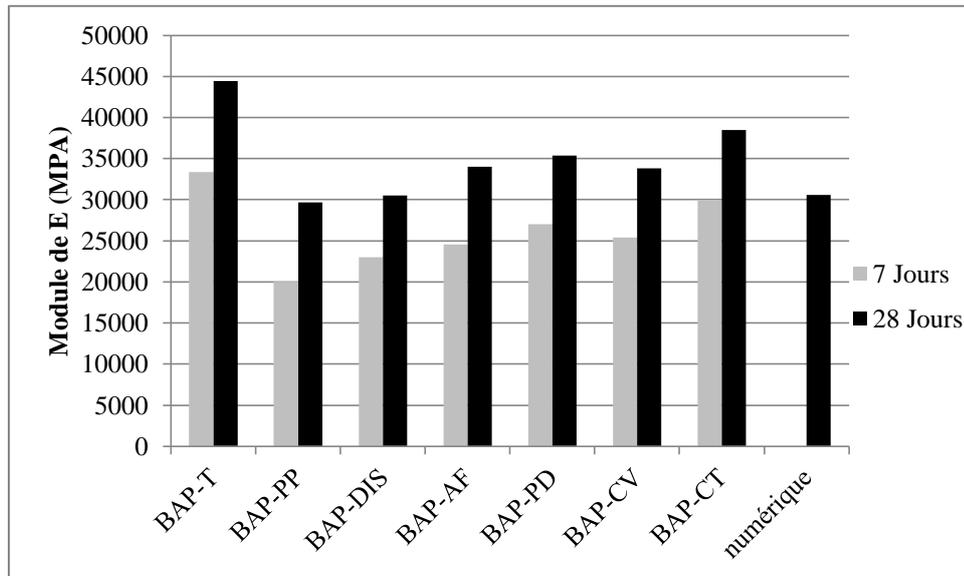


Figure 4-2 Evolution du module d'élasticité (E) des différents types de BAP.

En générale le module d'élasticité (E) du béton dépend de la matrice du ciment hydraté, du squelette granulaire, du rapport eau sur liant et du volume du ciment. Nous avons trouvé, d'après nos résultats que le module d'élasticité dépend aussi de la nature des fibres. D'après la figure 4-2 on constate que les valeurs du module des bétons fibrés varient d'une fibre à l'autre. On remarque aussi que les BAP fibrés montrent des valeurs inférieures que le témoin avec un pourcentage variant de 11 % à 40% à 7 jours et de 13 % à 33% à 28 jours. On explique ces constatations par la création des vides inter-faciales entre les fibres et la matrice. Ces pores supplémentaires diminuent la compacité, ainsi le module d'élasticité. Les BAP avec les fibres végétales présentent des résultats meilleurs que ceux avec les polypropylènes. Les BAP avec la fibre de chènevotte ont montrés un module plus élevé par rapport aux autres bétons fibrés. La valeur numérique du Bétonlab pro3 est proche de nos résultats expérimentaux.

4.1.3 Confrontation avec les codes et les modèles

Des chercheurs ont mis en place des équations pratiques et simples pour prévoir le module d'élasticité en fonction de la résistance à la flexion. Nous présentons sur la figure 4-3 la relation entre les valeurs du module E mesurées expérimentalement et celle calculées par des codes et modèles théoriques en fonction de la résistance à la flexion.

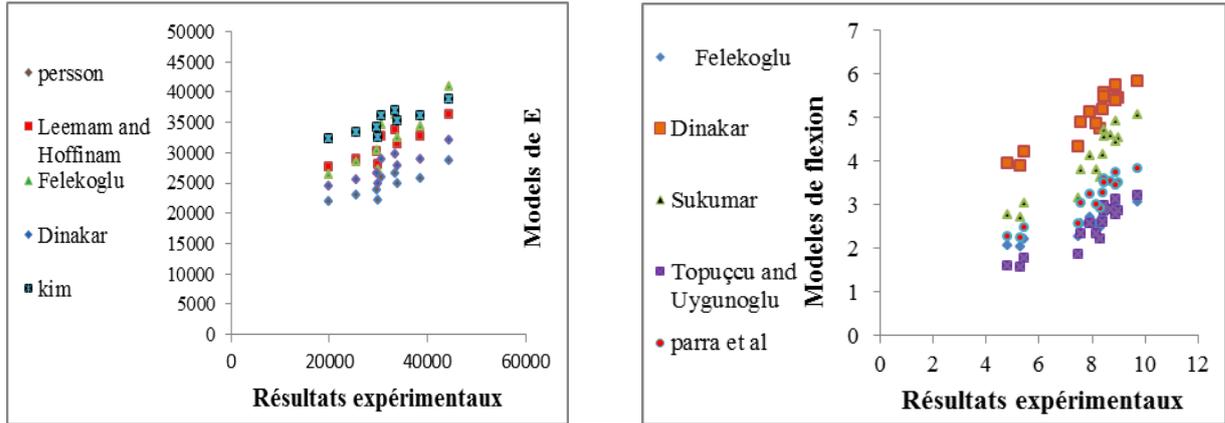


Figure 4-3 Relation entre les résultats expérimentaux et théoriques du module E.

Les résistances à la compression mesurées en laboratoire ont été utilisées dans les équations présentées dans le tableau 4-1 pour estimer théoriquement le module d'élasticité et la résistance à la flexion de notre béton. Les résultats obtenus en laboratoire sont significativement inférieurs par rapport aux différents modèles utilisés. Cette variation observée dans les tendances, étaient attendues car les modèles ne tiennent pas en compte des caractéristiques spécifiques des bétons autoplaçants fibrés (la présence des fibres et le volume de la pâte). Pour cela il est nécessaire améliorer ces codes de calcul en introduisant d'autres constantes comme : la teneur en fibres, le volume de pâte...etc).

Tableau 4-1 Différentes équations reliant le module E et la résistance à la traction (Vilanova, Fernandez-Gomez et al. 2011).

Mechanical property	Code	Estimating model	Units
Modulus of elasticity	ACI 318-08	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$	f'_c : (MPa) E_c : (MPa)
	EC-2	$E_c = 22(f_{cm}/10)^{0.3}$	f_{cm} : (MPa) E_c : (GPa)
	NZS 3101:2006	$E_c = 3320 \cdot \sqrt{f'_c} + 6900$	f'_c : (MPa) E_c : (MPa)
	CSA A23.3-04	$E_c = 4500 \cdot \sqrt{f'_c}$	f'_c : (MPa) E_c : (MPa)
Indirect tensile strength	ACI 363R-08	$f_{ct,sp} = 0.59(f_{cm})^{1/2}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,sp}$: (MPa)
	EC-2	$f_{ct,sp} = 1/3(f_{cm} - 8 \text{ MPa})^{2/3}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,sp}$: (MPa)
	NZS 3101:2006	$f_{ct,sp} = 0.54\sqrt{f'_c}$	f'_c : (MPa) $f_{ct,sp}$: (MPa)
	CSA A23.3-04	$f_{ct,sp} = 0.67\sqrt{f'_c}$	f'_c : (MPa) $f_{ct,sp}$: (MPa)
Modulus of rupture	ACI 363R-08	$f_{ct} = 0.94(f_{cm})^{1/2}$	f_{cm} : (MPa) f_{ct} : (MPa)
	EC-2	$f_{ct,\beta} = 0.435(f_{cm} - 8 \text{ MPa})^{2/3}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,\beta}$: (MPa)
	NZS 3101:2006	$f_{ct} = 0.8\sqrt{f_{cm}}$	f_{cm} : (MPa) f_{ct} : (MPa)
	CSA A23.3-04	$f_{ct} = 0.6\sqrt{f_{cm}}$	f_{cm} : (MPa) f_{ct} : (MPa)

E_c : Modulus of elasticity of concrete at 28 days. f'_c : characteristic compressive strength of concrete at 28 days. f_{cm} : Mean compressive strength of concrete at 28 days. $f_{ct,sp}$: Indirect tensile strength of concrete at 28 days. f_{ct} : Modulus of rupture of concrete at 28 days. $f_{ct,\beta}$: Modulus of rupture of concrete at 28 days (EC-2).

4.1.4 Analyse et discussion

Dans ce paragraphe nous allons essayer d'expliquer, en se basant sur les données de littérature, le mécanisme d'influence des fibres végétales sur comportement des bétons.

D. Sedan et al (Sedan, Pagnoux et al. 2007) ont montré que les fibres végétales de chanvre, par une forte teneur en pectine, fixent sur leur surface les ions de calcium Ca^{2+} et les ions

d'hydroxydes OH. Ainsi, ils ont observé un déficit en ions d'hydroxydes et de calcium dans la phase interstitielle. Ce déficit en OH et Ca entraîne une inhibition des hydrates de silicate de calcium (CSH) et par conséquent, induit des retards de prise. Ce qui conduit à une baisse des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (Tonoli, Savastano et al. 2010). N. Banthia and J. Sheng (Banthia and Sheng 1996) ont expliqué que la liaison interfaciale entre les fibres de Polypropylène et la pâte de ciment est faible en raison de leur surface lisse. De plus, le polypropylène est chimiquement inerte et hydrophobe, ce qui élimine la possibilité d'une liaison chimique. Par ailleurs, ils ont remarqué que les fibres végétales donnent de meilleures performances mécaniques que les fibres de polypropylènes à 28 jours. Ceci est dû à la surface rugueuse qui améliore l'interaction entre les fibres et la matrice (de Almeida Melo Filho, de Andrade Silva et al. 2013) (Mouhoubi, Osmani et al. 2012).

Silva et al (Da Silva, Helene et al. 2009) ont montré que l'adhérence entre les fibres et la matrice atteint son optimum à 14 jours. Ces auteurs ont montré que les fibres de sisal et de noix de coco traitées à l'hydroxyde de sodium voient leur résistance initiale diminuer respectivement de 72,7% et 60,9% après 420 jours. Ils ont expliqué cette diminution par l'attaque ultérieure de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui peut être liée à une cristallisation de la chaux dans les pores des fibres. La structure particulière des fibres végétales, la lignine et de la pectine sont les deux premiers composants à ressentir l'impact de la dégradation dans les environnements agressifs (milieu alcalin du ciment). Cette dégradation de ces composantes provoque la séparation des fibres de cellulose. Ce qui provoque la création des vides entre la matrice et les fibres ainsi, une diminution des performances mécaniques des bétons. Silva et al (Da Silva, Helene et al. 2009) ont confirmé aussi que les variations de la section transversale des fibres affecte l'adhérence de celles-ci. En ce sens, les valeurs les plus élevées de la contrainte d'adhérence ont été enregistrées pour les fibres qui ont des formes en arc ou en torsadées.

Afin d'éviter la dégradation des fibres naturelles introduites dans la matrice de ciment il faut réduire la concentration de l'hydroxyde de calcium. Cela peut se faire en substituant le ciment par une matière pouzzolanique (cendre volante, metakaolin...etc.) (Mohr, Biernacki et al. 2007).

4.1.5 Comportement différé

4.1.5.1 *Retrait endogène*

Le retrait endogène est dû principalement à l'hydratation du ciment pour ce qui a trait au calcul des structures. Le retrait qui nous intéresse est uniquement celui qui intervient après la prise de la pâte de ciment c'est-à-dire que l'on fera abstraction du retrait plastique. La figure 4-4 montre l'évolution du retrait endogène en fonction du temps des différents mélanges fibrés jusqu'à 200 jours de cure.

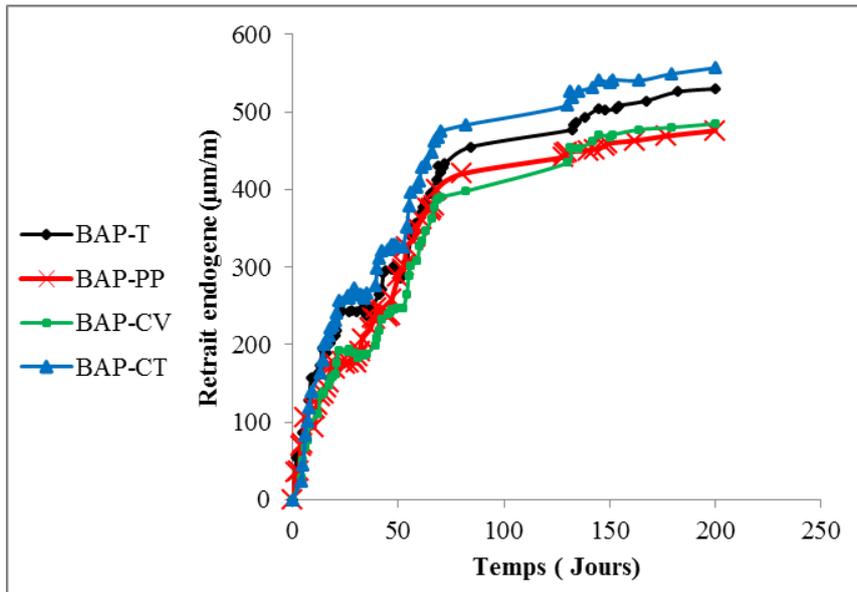


Figure 4-4 Evolution du retrait endogène en fonction du temps des différents mélanges.

Pendant les premiers jours, l'augmentation de la déformation a été observée pour tous le type de fibre. Le changement de l'évolution aura lieu après dix jours.

On peut remarquer que le retrait d'auto-dessiccation du BAP-CT est le plus grand. Par contre l'introduction les fibres de chanvre et de polypropylène entraine une diminution de la déformation différée des BAP par rapport au BAP témoin. A court terme, on constate que la cinétique de la déformation est rapide durant quelques jours après la prise. A long terme, la déformation est caractérisée par une cinétique très lente. Ceci est expliqué par le fait que la réaction d'hydratation cesse en raison d'un manque d'eau dans le réseau poreux Tazawa et Miyazawa (Tazawa 2014).

Le retrait endogène est un phénomène relatif à l'hydratation du ciment. Ainsi, la cinétique de ce retrait change suivant l'évolution des réactions chimiques du ciment. L'ajout des fibres végétales dans le BAP semble affecter cette hydratation. Par conséquent ces renforts ont un effet important sur le retrait endogène. Cela peut être expliquer par la dissolution de matières extractibles à la surface des fibres dans le mélange cimentaire, ce qui perturbe l'hydratation du ciment et retarde le début de prise (Sedan, Pagnoux et al. 2007). On suppose également que l'absorption d'eau par les fibres végétales joue un rôle considérable sur ce phénomène.

4.1.5.2 *Retrait total*

Le retrait total c'est la somme du retrait de dessiccation et le retrait endogène. La figure 4-5 montre l'évolution des déformations différées totales des BAP à base de fibres végétales (chanvre, chènevotte et synthétique).

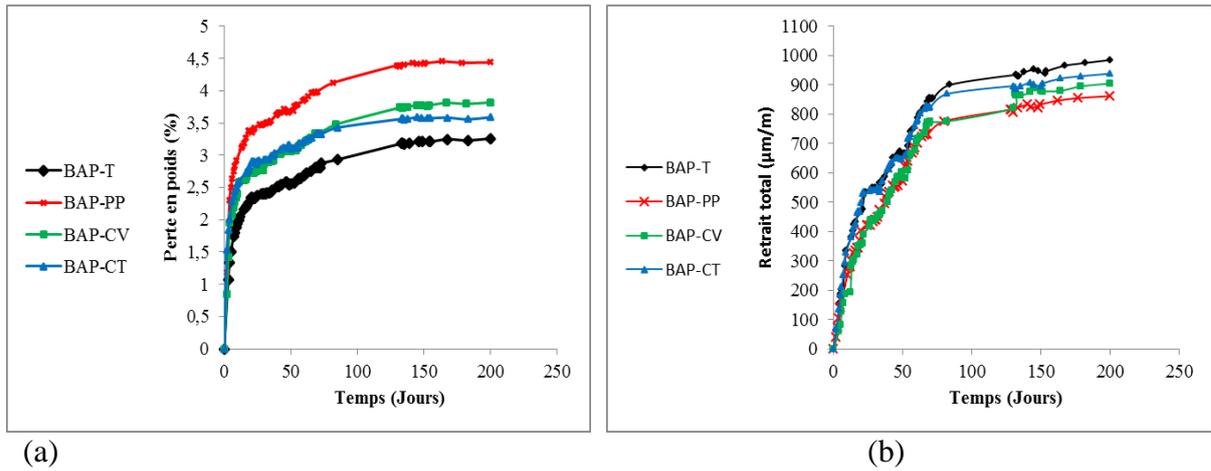


Figure 4-5 (a) la perte en masse (b) Evolution de la déformation du retrait total des différents bétons autoplaçants

On remarque à partir de la figure 4-5 qu'aux premiers jours, aucune différence mesurable n'est observée pour les différents BAP. Par contre au-delà de 10 jours l'écart évolue rapidement. La cinétique de la déformation du retrait est rapide et probablement due au fort gradient d'humidité existant entre le matériau testé et le milieu extérieur. Par la suite, sa cinétique devient lente à cause du séchage.

On constate que l'introduction des fibres de chanvre, chènevotte et polypropylène dans les BAP engendre une diminution des déformations différées totales de 21% à 18% par rapport au témoin. Les BAP-CV représente un comportement similaire que les BAP-PP.

Le tableau suivant montre le rapport du retrait entre les bétons avec des fibres et le témoin.

Tableau 4-2 Rapport entre le retrait des bétons avec fibres et le béton témoin.

Eprouvette	Retrait à 200 jours	Retrait exprimé en pourcentage de l'éprouvette témoin (sans fibre)
BAP-T	920	100%
BAP-CV	885	88%
BAP-CT	901	93%
BAP-PP	820	85%

A partir du tableau 4-2 on constate que les BAP-PP et les BAP-CV présentent un retrait de 20% moins important que au celui du témoin. Cette diminution a été confirmée par les travaux de (Corinaldesi et Moriconi 2011). Ces auteurs ont utilisé des fibres de polypropylènes dans les bétons ordinaires. Ils ont trouvé que la présence des fibres de polypropylène avec les cendres volantes conduit à une diminution de 20% du retrait par rapport à celui du béton sans fibre.

Concernant la perte de masse on constate à partir de la figure 4-5 (a) qu'après 5 jours tous les BAP avec fibres présentent une amplitude et une cinétique similaires.

Après 5 jours on remarque que les BAP-CV, les BAP-CT et les BAP-PP présentent une perte de masse importante comparativement au BAP-T d'environ 25%, 30% et 45 % respectivement. Par contre les BAP-PP subissent une perte d'eau considérable par rapport à tous les autres BAP fibrés.

Ces résultats confirment que les fibres créent des pores supplémentaires provoquant une migration d'eau de béton vers l'extérieur, en conséquence le taux de la perte de masse est élevé.

Ainsi, on conclut que le phénomène du retrait est plus complexe que le phénomène de la perte en masse. C'est pour cette raison que nous allons étudier dans ce qui suit la relation entre la perte en poids et le retrait total.

4.1.5.3 Relation entre perte en poids et retrait total

Certaines recherches s'intéressent à la relation entre la perte en poids et le retrait. La cinétique du retrait de dessiccation est liée à celle du départ de l'eau et dépend des conditions ambiantes. Nous présentons sur la figure 4-6 le retrait en fonction de la quantité d'eau perdue.

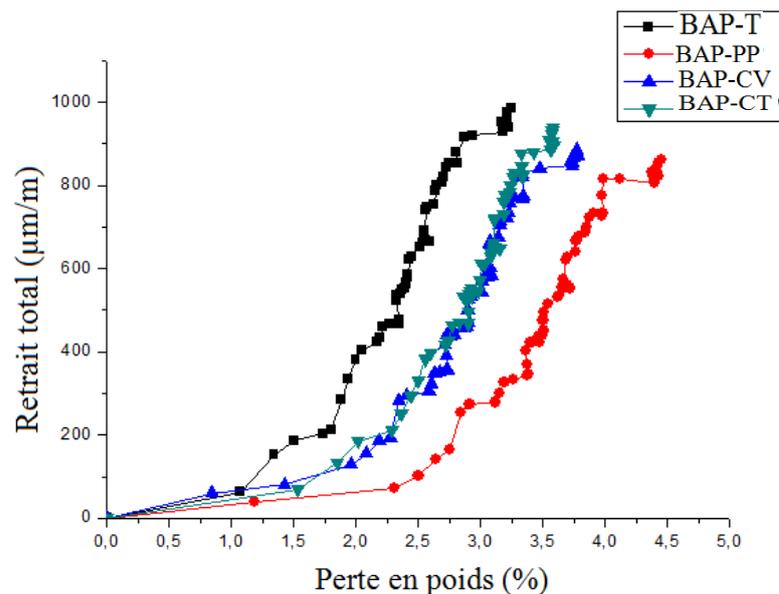


Figure 4-6 Relation entre la perte en poids et le retrait total.

On constate à partir de la figure 4-6 un écart important entre les différents mélanges étudiés. Ce phénomène peut s'expliquer soit par le fait que la contraction de la matrice cimentaire devient infinie par épuisement d'eau évaporable, soit par le passage d'un comportement linéaire à un comportement non linéaire sans contrainte hydrique.

On remarque que la perte de masse nécessaire pour amorcer le retrait varie selon la nature des fibres. La perte de masse qui provoque le retrait du BAP-PP est plus élevée que celle du BAP-FV et du BAP-T. De plus, au cours de la deuxième phase, le développement du retrait est beaucoup plus progressif pour les BAP-T. Les BAP-CV et BAP-CT présentent un comportement similaire.

D'après la littérature, les courbes retrait/perte en poids se décomposent en trois phases.

- La première : une zone « dormante » : en effet, de l'apparition de la microfissuration sur la surface des éprouvettes provoque la déformation du retrait lié au départ d'eau (Khelidj, Loukili et al. 1998). Cependant certains chercheurs (Turcry, Bonnet et al. 2007) ont montré le contraire. Ils ont expliqué que la cause de la fissuration de la peau

du béton est l'effet des forts de gradient de l'humidité entre surface et le cœur du béton. Cette fissuration diminue considérablement l'amplitude du retrait mesuré.

- La deuxième : la zone où le retrait est proportionnel à la perte en masse, l'évolution du retrait est rapide.
- La troisième : où les quatre bétons atteignent la dernière phase à savoir la phase de stabilité où le retrait atteint 80% de la valeur finale.

4.1.5.4 *Retrait de séchage*

La différence entre le retrait total et le retrait endogène est appelée retrait de dessiccation (ou retrait de séchage). Ce retrait est provoqué par la dépression capillaire due à la migration de l'eau et sa consommation par l'hydratation des grains anhydres.

La figure 4-7 représente l'évolution des déformations différées due au retrait de dessiccation des différents mélanges en fonction la nature des fibres jusqu'à 200 jours d'âge.

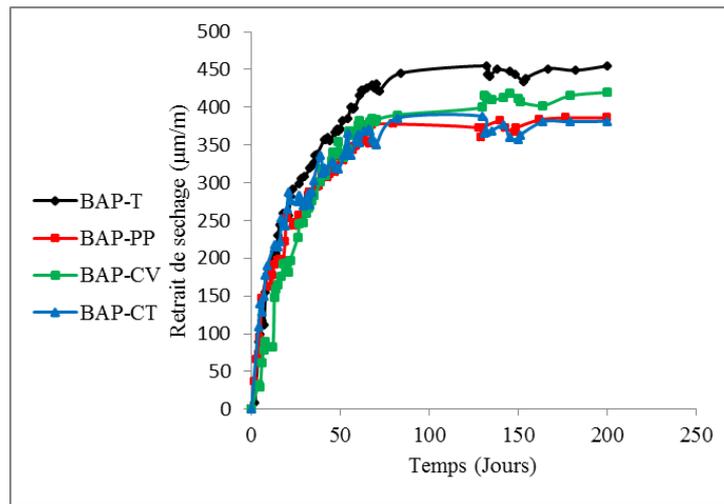
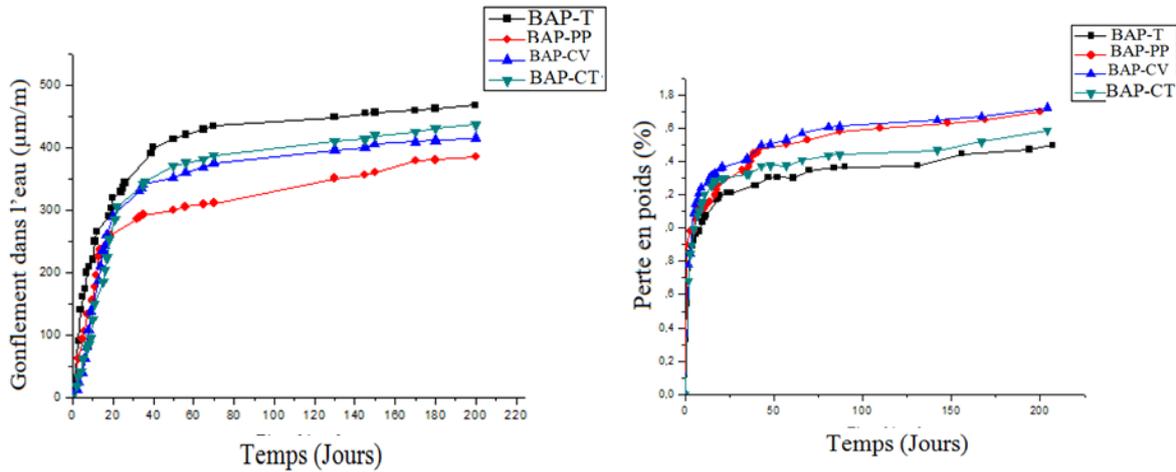


Figure 4-7 Evolution du retrait de séchage des différents bétons autoplaçants.

On note à partir de la figure 4-7 que le remplacement des fibres de polypropylènes par des fibres végétales de chanvre et de chènevotte diminue le retrait de dessiccation des BAP d'environ 25% et 20% respectivement par rapport au témoin. On remarque aussi que l'amplitude du retrait de dessiccation est plus élevée que celle du retrait endogène. Nos résultats sont différents de ceux de certains auteurs (Romildo D. Toledo Filho et al 2005). Ces auteurs ont indiqué que l'introduction dans les mortiers cimentaires des fibres végétales augmentant le retrait de séchage. Cette contradiction peut être due à l'effet des gros granulats et à la variation de la nature des fibres.

4.1.5.5 *L'expansion dans l'eau*

Il est nécessaire de distinguer le gonflement d'origine chimique, qui est dû à la transformation de l'ettringite et le gonflement qui est induit par la conservation d'une pâte de ciment ou d'un béton dans l'eau. La figure 4-8 présente le gonflement dans l'eau des différents BAP utilisés.



(a)

(b)

Figure 4-8 (a) Evolution de l'expansion des différents BAP (b) Gain de masse des différents BAP.

On remarque que l'introduction des fibres augmente la masse des BAP fibrés d'environ 12 à 15% par rapport au BAP témoin. Par contre leur variation dimensionnelle diminue par rapport au BAP-T d'environ des 29%, 22% et 20% pour les BAP-PP, BAP-CV, BAP-CT respectivement. On explique ce phénomène de gonflement par l'intrusion de l'eau qui réduit la tension de surface du gel dans le béton, provoquant par la suite une expansion. Les phénomènes de capillarité sont responsables aussi du gonflement dans l'eau (Neville 1995).

4.1.5.6 *Fluage propre*

La déformation du fluage propre est la déformation mesurée sur une éprouvette chargée et protégée contre la dessiccation externe. Son amplitude est liée à la quantité d'eau libre existante au sein du béton qui subit une charge constante (Chabane et Houari 2000) (Acker et Ulm 2001).

La figure 4-9 montre l'évolution du fluage endogène en flexion des différents mélanges effectués jusqu'à 200 jours de chargement.

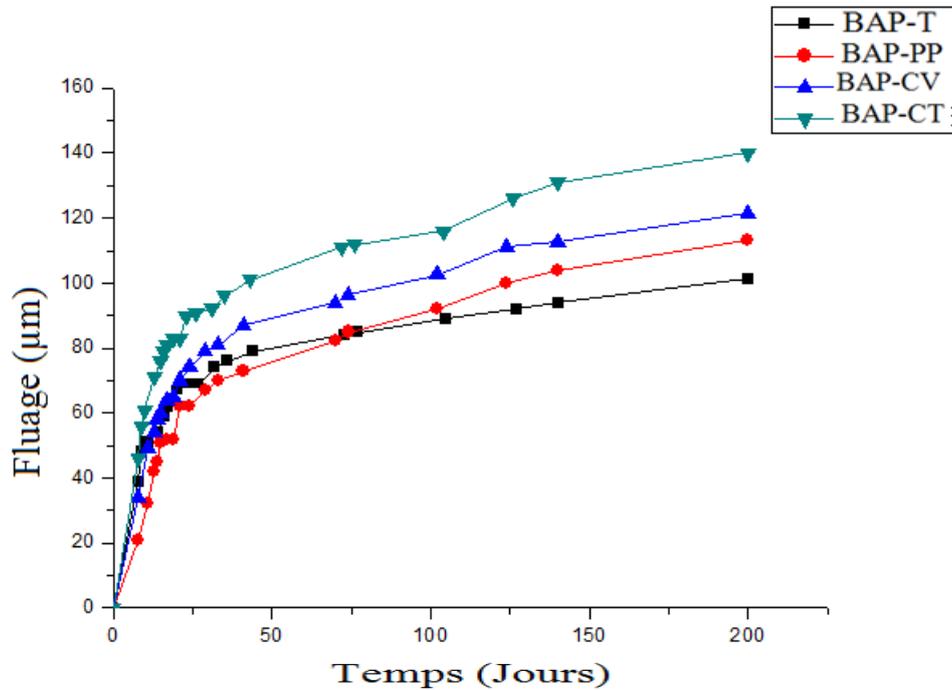


Figure 4-9 Fluage propre des différents BAP.

Pendant les premiers jours de chargement, une augmentation de la flèche est observée quel que soit le type de fibre. Ces observations sont en accord avec la théorie du fluage propre à court terme. Cette théorie est basée sur le mécanisme de micro-diffusion d'eau sous pression (Ranaivomanana, Multon et al. 2013).

On remarque que le fluage propre du BAP-T est le plus faible par rapport à celui des autres BAP. Par conséquent l'introduction des fibres dans les BAP tel que le chanvre, chènevotte et polypropylène entraîne une augmentation du fluage à 200 jours d'environ 15%, 25% et 11% respectivement.

A court terme, on constate que la cinétique de la déformation du fluage propre est rapide. Par contre à long terme, la déformation est caractérisée par une cinétique très lente. En effet, la réaction d'hydratation génère des tensions capillaires liées à la consommation d'eau. Cette réaction a modifié l'état de consommation d'eau au niveau de la microstructure du béton. De plus les contraintes macroscopiques appliquées sur les bétons lors de chargement aident l'effet des tensions capillaires (Benboudjema 2002). Donc l'eau semble jouer un rôle fondamental dans le mécanisme de fluage propre du béton (Bazant, Hauggaard et al. 1997). Les BAP-CV et BAP-CT présentent un fluage propre plus élevé que le BAP-PP d'environ 36% et 11% respectivement.

Concernant le mécanisme microstructural, on trouve que la dissolution de matières extractibles à la surface de ces fibres dans le mélange de ciment perturbe l'hydratation du ciment et retarde le début de prise (Sedan, Pagnoux et al. 2007) (Diquélou, Gourlay et al. 2015) (Tonoli, Savastano et al. 2010). Par conséquent, on suppose que ce retard du durcissement implique une augmentation du fluage propre.

Ainsi, la diminution de la résistance à la flexion des BAP-F provoque un fluage plus important que le BAP-T. De plus, l'interface entre les fibres et pâte de ciment peut aussi affectée le fluage à travers la production des microfissures à l'intérieur du béton.

4.1.5.7 Fluage total

La flèche totale c'est l'addition de la flèche de dessiccation à la flèche endogène. La figure 4-10 montre l'évolution des déformations différées totales des BAP-T et BAP-F soumis à une contrainte flexionnelle.

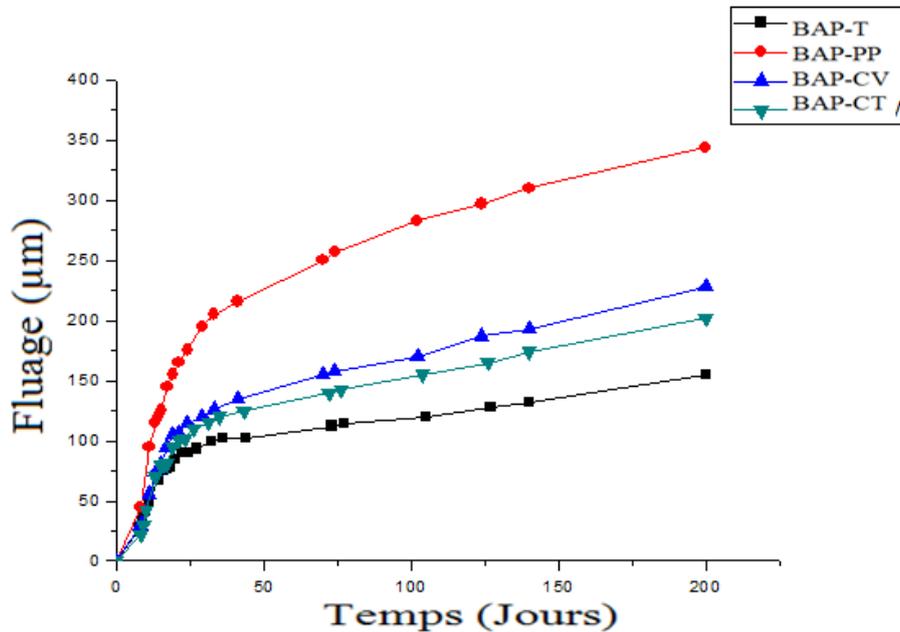


Figure 4-10 Evolution du fluage total des BAP avec et sans fibre.

A partir de la figure 4-10 on constate que le remplacement des fibres polypropylènes par des fibres de chanvre et de chènevotte engendre une diminution considérable de fluage total d'environ 24 % et 44% respectivement. Par contre l'introduction de ces mêmes fibres dans les BAP entraîne une augmentation de la flèche d'environ de 14% et 16%. Cette évolution est probablement due à la bonne résistance en flexion des BAP-T. Des explications de cette variation de résultats entre les BAP fibrés sont données dans les travaux de (Zhao, Yu et al. 2016). Ces derniers ont étudié l'effet des fibres polypropylène et d'alchole sur le fluage spécifique. Ils ont conclu que l'introduction de ces fibres dans les bétons augmente la déformation du fluage. Ceci est dû à deux mécanismes différents : les fibres qui ont eu un module d'élasticité plus important présentent de bonnes capacités de résistance au fluage. Ainsi les fibres les plus rigides peuvent mieux épinglez les microfissures du béton. Dans notre cas la fibre de chènevotte est plus dure que les autres fibres indiquant une bonne résistance à la déformation du fluage.

Selon (Zhao, Yu et al. 2016) les défauts internes introduits par l'addition de fibres dans les bétons peuvent être décrits de deux manières : La première est la distribution non homogène des fibres. Ce qui entrainera des faiblesses des différentes performances du béton à

l'exception du fluage. La deuxième est l'interface fibre-matrice qui crée des microfissurations à l'intérieur du béton. Par conséquent, les fibres de chanvre ont montré une bonne adhérence au béton grâce de leur fibrillaire par rapport à la fibre de polypropylène.

4.1.5.8 Coefficient de fluage

Le coefficient de fluage est calculé en divisant la déformation totale subie par le matériau à une échéance donnée par la déformation instantanée. Ce paramètre est primordial pour le dimensionnement des structures en béton précontraint. Le tableau 4-3 indique le coefficient de fluage des différents BAP.

Tableau 4-3 Coefficient de fluage des différents BAP.

		30 J	90 J	140 J	200 J
SCC-C	Total	1.75	1.90	1.99	2.19
	Propre	1.56	1.65	1.71	1.79
SCC-PP	Total	2.38	2.84	3.01	3.36
	Propre	1.47	1.61	1.72	1.79
SCC-HE	Total	1.84	2.10	2.25	2.54
	Propre	1.53	1.66	1.74	1.85
SCC-SVH	Total	1.82	2.9	2.23	2.47
	Propre	1.66	1.82	1.94	2.05

$$\phi(t, \tau) = \frac{\varepsilon_f(t, \tau)}{\varepsilon_i(\tau)}$$

$\varepsilon_f(t, \tau)$, $\varepsilon_i(\tau)$ décrivent déformation le fluage à l'instant t d'une éprouvette chargée à l'instant τ et la déformation instantanée mesurée à l'instant τ de l'application de la charge respectivement.

Le tableau 4-3 montre que la cinétique de la déformation différée varie selon la durée de chargement et la nature des fibres. Le coefficient de fluage varie rapidement jusqu'à 90 jours. A 140 jours les valeurs de la déformation différée des BAP-PP atteignent 3 fois la flèche instantanée. Cela s'explique par l'introduction des fibres dans les mélanges qui montre un comportement ductile provoquant une fragilité du béton. Cette constatation met en évidence l'importance de la déformation du fluage par rapport aux déformations instantanées. Ces résultats ont été également trouvés par Basant (Bazant, Hauggaard et al. 1997). On remarque aussi que le coefficient de fluage du mode total est plus élevé que celui du mode d'endogène. Ceci est dû à la migration d'eau vers l'extérieur provoquant une diminution de la résistance des bétons. On conclut que ce coefficient ne dépend pas uniquement du type de sollicitation, mais il varie aussi avec le mode de conservation et la présence ou non des fibres dans la matrice cimentaire.

4.1.5.9 Fluage de dessiccation

La différence entre le fluage mesuré dans les conditions de déséquilibre hygrométrique et le fluage propre est appelée le fluage de dessiccation. La figure 4-11 représente l'évolution du fluage de dessiccation des mélanges selon la nature des fibres jusqu'à 140 jours de chargement.

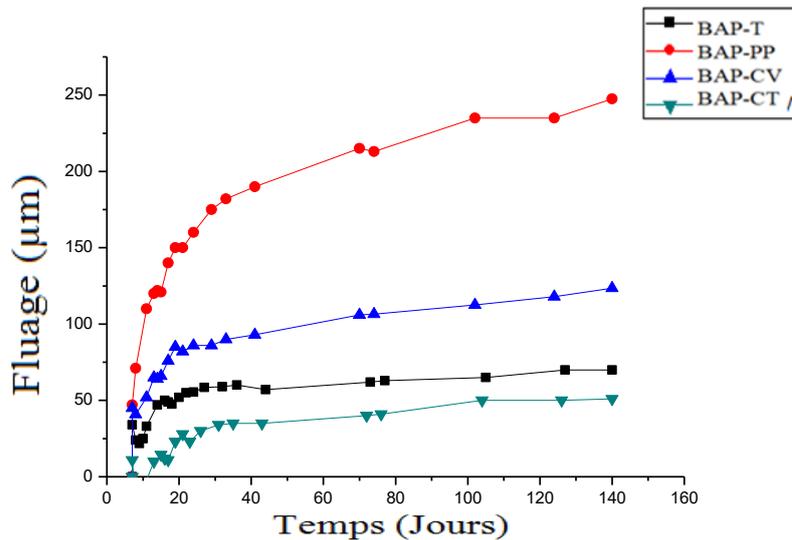


Figure 4-11 Evolution du fluage de dessiccation des BAP-F.

On remarque que le remplacement des fibres polypropylènes par les fibres végétales, chanvre et de chènevotte diminue le fluage de dessiccation de 50% et 80% respectivement. Par contre l'introduction des fibres de chènevotte dans les BAP diminue le fluage de dessiccation de 37% par rapport à celui du témoin.

Il est généralement connu que le fluage est la combinaison de plusieurs mécanismes agissant ensemble à l'échelle des produits hydratés (théorie du flux visqueux, plastique, du suintement, consolidation, micro-contrainte, l'eau adsorbée).

Selon les chercheurs (Bazant, Hauggaard et al. 1997) le fluage intrinsèque de dessiccation est lié à deux processus différents de diffusion de l'humidité : une diffusion macroscopique et une microscopique au niveau des pores du matériau. Le flux local des molécules d'eau entre les zones d'adsorption et les pores capillaires accélère le processus de rupture des liaisons atomiques entre les CSH. Cela conduit à l'apparition importante de la déformation de fluage de dessiccation.

On conclue que durant l'application de la charge de flexion, les fissures superficielles du béton augmentent dans la fibre inférieure de la poutrelle. Ainsi, la présence des fibres dans les bétons crée des cavités provoquant la migration d'eau de béton à l'extérieur. Cela va favoriser la propagation des fissures dans les poutres. Par conséquent, cette hypothèse pourrait expliquer de la flèche importante des BAP des fibres végétales par rapport au BAP témoin.

4.1.5.10 Flèche instantanée selon le mode de conservation

La déformation instantanée dépend de la vitesse de l'application de la charge. Dans ce cas il n'est pas facile de séparer cette déformation de la déformation différée. Dans nos essais expérimentaux le chargement a été appliqué quasi-instantanément pour éviter les effets dynamiques indésirables (Ranaivomanana, Multon et al. 2013).

Les déformations instantanées élastiques mesurées au moment du chargement des éprouvettes sont représentées dans la figure 4-12.

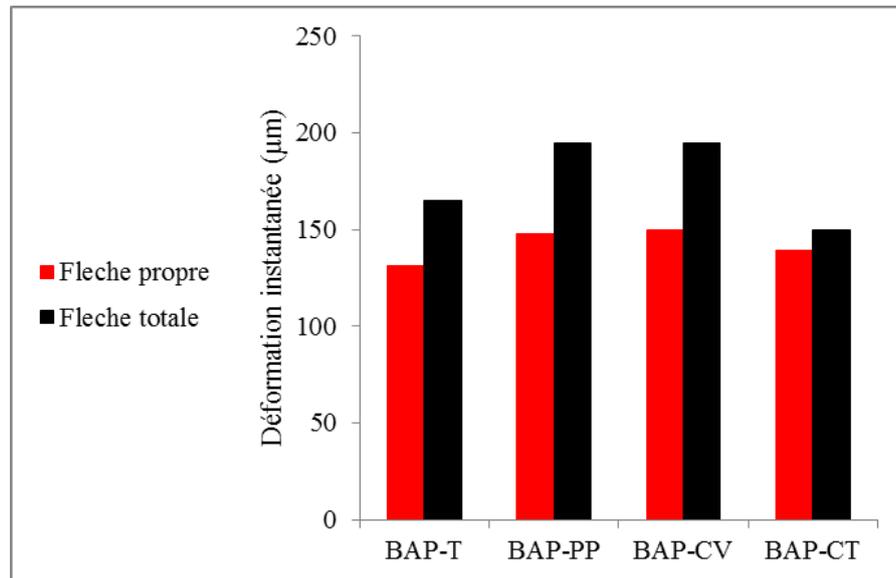


Figure 4-12 Evolution de la flèche instantanée selon le mode de conservation et le type de mélange.

D'après la figure 4-12 on remarque que l'incorporation des fibres dans les bétons autoplaçants augmente la flèche instantanée. Le taux de cette augmentation par rapport au témoin est de l'ordre de 15% pour BAP-PP et BAP-CV dans le mode endogène. Par contre on constate une diminution de 10% pour les BAP-CT. Concernant le mode total on a observé une croissance de la flèche d'environ 11%, 12 % et 5% pour les BAP-PP, BAP-CV et BAP-CT respectivement par rapport au BAP-T. Ainsi on remarque que la déformation instantanée des BAP dans le mode propre est plus élevée que ceux dans le mode total avec des valeurs d'environ 7% à 23%.

De plus, on note que les bétons avec une résistance importante révèlent une déformation plus faible. On remarque aussi que les BAP avec les fibres de chènevotte représentent moins de déformation par rapport aux autres BAP fibrés. Cela peut être expliqué par le fait que les fibres de chènevottes sont rigides et donne une résistance à la flexion plus importante. Le BAP-PP montre une flèche plus importante que celle de tous les autres mélanges. On conclut que l'introduction des fibres végétales est plus efficace que celle des fibres de polypropylène.

4.1.5.11 *Recouvrance*

Si l'on effectue un déchargement total au temps t_1 d'une éprouvette chargée initialement au temps t_0 , la déformation totale ε_i diminue d'abord d'une manière instantanée d'une valeur égale à ε'_i avec en général $\varepsilon'_i < \varepsilon_i$. Par la suite, la diminution de la déformation se poursuit lentement dans le temps. Ce phénomène est appelé retour de fluage ou recouvrance.

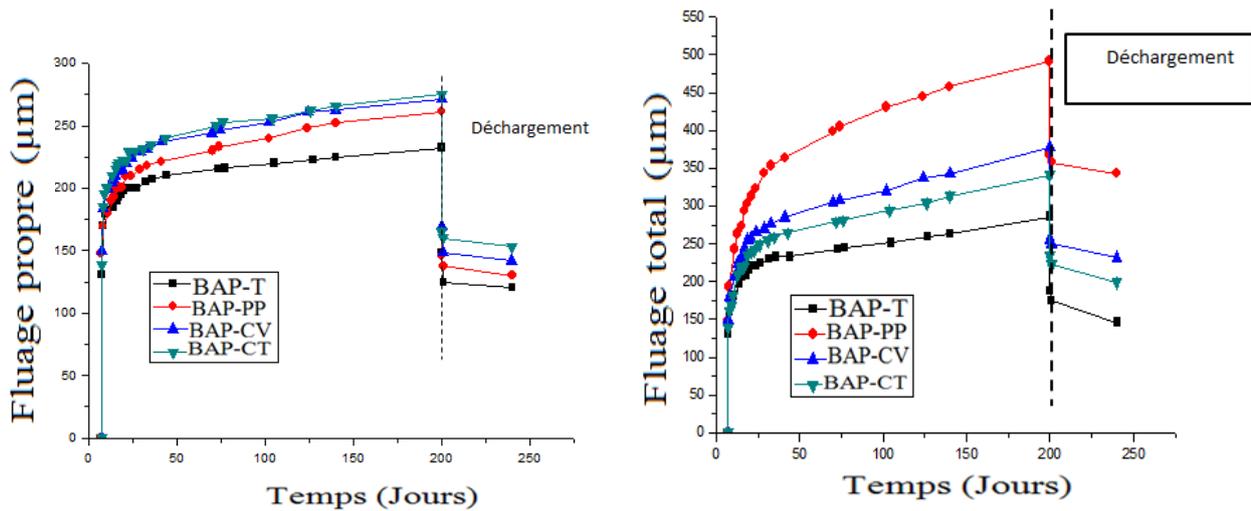


Figure 4-13 Recouvrance de tous les mélanges pour les deux modes de conservation.

Tableau 4-4 Valeurs de la flèche instantanée et la recouvrance de différents mélanges.

	Fleche instantanée (totale) (µm)	Fleche instantanée (endogène)(µm)	Recouvrance (mode totale) (µm)	Recouvrance (mode endogène) (µm)
BAP-T	165	131	100	84
BAP-PP	195	148	129	115
BAP-CV	195	150	125	102
BAP-CT	150	139	108	110

La figure 4-13 se décompose en deux parties, la première partie : à l'instant t (au moment de déchargement à 200 jours) est nommée la recouvrance instantanée. Dans cette phase on constate une diminution considérable de la déformation, précisément pour les BAP-PP et les BAP-CV. Ces résultats confirment que la présence des fibres dans les bétons autoplaçants diminue la capacité de la résistance à la déformation de fluage. On remarque aussi que le taux de la recouvrance du fluage total est plus élevé que le fluage endogène. Par contre la flèche instantanée est la plus grande dans le mode propre que le mode total.

La deuxième partie : après 40 jours de déchargement on constate que la flèche continue de diminuer (la recouvrance différée) particulièrement dans le fluage total. Par contre concernant le fluage propre le retour de la flèche se stabilise.

Dans le premier retour instantané, les granulats qui étaient sous contrainte à la compression, libèrent leur énergie en provoquant une mise en traction de la pâte de ciment (Acker et Ulm 2001). La seconde étape constitue une phase de retour des déformations différées avec une cinétique analogue à un fluage inversé. Elle est directement liée à la cinétique de fluage en traction de la pâte de ciment et se prolonge durant une année. La cinétique d'évolution est caractérisée par un temps de retard ou temps caractéristique approximativement équivalent à la cinétique de fluage.

4.1.5.12 *Relation entre les caractéristiques mécaniques et le fluage du béton:*

Le module d'élasticité et la résistance à la flexion à 7 jours des différents bétons sont présentés dans le tableau 4-5.

Tableau 4-5 Module d'élasticité et la résistance à la flexion à 7 jours des différents bétons.

	Module de E (MPa)	Fluage (μm)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
BAP-T	29800	287,5	8,46	46,06
BAP-PP	21200	488,5	7,47	27,76
BAP-CV	25423,73	378,1	8,31	33,35
BAP-CT	27300	323	8,39	39,65

On prend le fluage, le module E et la résistance à la flexion de 7 jours du béton sans fibre comme unité 1. Les valeurs relatives au fluage de tous les bétons autoplaçants fibrés après 200 jours de charge, la résistance à la flexion et le module E à 7 jours sont représentées dans le tableau 4-6.

Tableau 4-6 Valeurs relatives du fluage de la résistance à la flexion et du module élastique de tous les bétons autoplaçants fibrés après 200 jours de charge.

	Module d'élasticité (E_c)	Résistance à la flexion	Résistance à la compression	Fluage
BAP-T	1	1	1	1
BAP-PP	0,71	1,7	0,88	0,6
BAP-CV	0,85	1,31	0,98	0,72
BAP-CT	0,91	1,12	0,99	0,86

On remarque que le fluage du béton augmente avec la diminution de la résistance à la flexion et le module d'élasticité du béton. Ce résultat a été trouvé également par Q. Zhao et al (Zhao, Yu et al. 2016) qui montrent qu'il y a une bonne corrélation entre le module d'élasticité, la résistance à la flexion du béton et le fluage. A titre d'exemple les mélanges BAP-PP, BAP-CV et BAP-CT présentent une faible résistance à la flexion avec des diminutions de 12%, 10% et 5% respectivement par rapport au BAP-T. Ce qui a conduit à un fluage plus élevé de 40%, 20% et 15% respectivement pour les BAP-PP, BAP-CV et les BAP-CT. Nous constatons également que le fluage à long terme est aussi lié aux performances mécaniques du béton.

On a trouvé, par ailleurs que les fibres diminuent légèrement la résistance à la flexion, ce qui a conduit à une augmentation de la déformation différée du fluage.

4.1.6 **Conclusion**

La déformation différée du matériau peut conduire au mécanisme de défaillance de l'élément structurel. Les bétons autoplaçants sont communément considérés comme des matériaux présentant une déformation différée élevée par rapport au béton traditionnel. Notre étude nous conduit à faire les conclusions suivantes :

- ✓ L'analyse de la déformation différée d'origine physico-chimique comme le retrait endogène montre que les fibres ont une influence importante sur ce phénomène. La présence de ces fibres dans les BAP a conduit à un retrait moins important que celui des BAP sans fibre sauf les BAP-CT.
- ✓ Le retrait de dessiccation des BAP avec fibres est plus faible que celui du BAP-T.
- ✓ La perte de masse dans les mélanges avec fibres est plus élevée que dans le béton témoin. Le BAP-PP donne la plus grande perte en masse. Par conséquent la création des pores supplémentaires provoque une migration d'eau de béton vers l'extérieur. Cette migration d'eau favorise la propagation des fissures dans les bétons.
- ✓ Concernant le gonflement dans l'eau : Les BAP-F présentent une variation dimensionnelle plus faible que le BAP-T.
- ✓ La déformation instantanée des BAP fibrés est plus élevée que celle du témoin (sans fibres). Cela pourrait être dû au comportement ductile de ces fibres et la faible tendance de la résistance des BAP-F par rapport aux BAP-T.
- ✓ Concernant le fluage de dessiccation : les BAP fibrés ont montré une plus grande déformation par rapport au témoin, sauf le BAP avec les fibres de chènevotte.
- ✓ Le taux de la recouvrance du fluage total est plus élevé que celui du fluage endogène. Notons également que la flèche instantanée est plus importante dans le mode propre que celle dans le mode total.

D'après ces résultats expérimentaux on peut dire que les fibres végétales diminuent le retrait de dessiccation et le retrait endogène des bétons autoplaçants en particulier la fibre de chanvre. Ainsi, les fibres végétales représentent un effet positif sur le phénomène du retrait en plus de leur intérêt écologique.

4.2 Comportement vis-à-vis de la durabilité

4.2.1 Comportement au feu

4.2.1.1 *Résistance à la compression résiduelle*

La figure 4-14 montre la variation de la résistance à la compression des différentes formulations étudiées en fonction de la température. Les propriétés résiduelles (mesurées après chauffage et refroidissement) ont été comparées aux propriétés initiales.

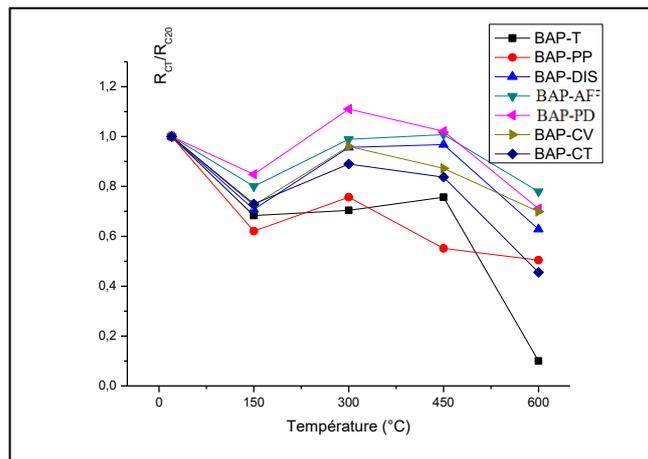


Figure 4-14 Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température.

Le comportement des BAP avec des fibres et sans fibres diffère sensiblement entre 20°C et 600 ° C. Ainsi :

A une température comprise entre 20°C et 150°C : une diminution de la résistance pour tous les BAP a été remarquée. Cette diminution varie entre 15% et 38%. La plus faible résistance concerne les BAP-PP, Cela est dû probablement à la fusion de la fibre de polypropylène provoquant des pores supplémentaires. Ces pores ont conduit à une réduction rapide de la résistance. Les BAP avec les fibres végétales présentent une légère diminution d'environ de 15%, notamment pour les BAP-PD.

A une température entre 150 et 300°C : on observe une augmentation importante de la résistance d'environ de 8% à 26%. d'après Hanaa Fares (Fares, Remond et al. 2010) l'augmentation de la résistance est due à l'effet de la réhydratation de la pâte et la migration de l'eau dans les pores. On constate que les BAP avec les fibres végétales ont un meilleur comportement par rapport au BAP sans fibre et au BAP avec fibres polypropylène.

A une température comprise entre 300 et 450 °C : une diminution de la résistance est observée pour les mélanges BAP-PD, BAP-CV, BAP-CT et BAP-PP de 13% à 45% par rapport à la température ambiante. On peut également observer une légère augmentation de la résistance de 1% à 5% entre 300°C et 450°C pour les BAP-T, BAP-DS et BAP-AF. Certains chercheurs attribue cette perte de résistance à la décomposition de l'hydroxyde de calcium (Behnood et Ghandehari 2009)

A une température de 600 °C : tous les échantillons présentent une diminution de la résistance de 23 % à 90 %. Les mélanges présentent de faible dans ses propriétés mécaniques. La microstructure est détériorée rapidement par une transformation chimique par le changement de la brucite et la décomposition de la portlandite. A ces températures, de nombreuses fissures ont été observées dans la zone de transition interfaciale pâte /granulat (Fares, Remond et al. 2010). Le BAP-T et le BAP-CT ont subi un éclatement lié à l'accumulation de la pression interne.

En conclusion, les fibres végétales jouent un rôle important sur le comportement mécanique des bétons autoplaçants sous élévation de la température.

Ces résultats montrent que ces fibres sont efficaces pour protéger les bétons contre l'éclatement.

Une description détaillée sur le mécanisme des fibres végétales dans les matériaux cimentaire soumis à une élévation de la température est illustrée dans le paragraphe (5-4-3-1)

4.2.1.2 Résistance à la flexion résiduelle

La figure 4-16 présente le rapport des résistances à la flexion des BAP par rapport à celle de la température ambiante (20 ° C).

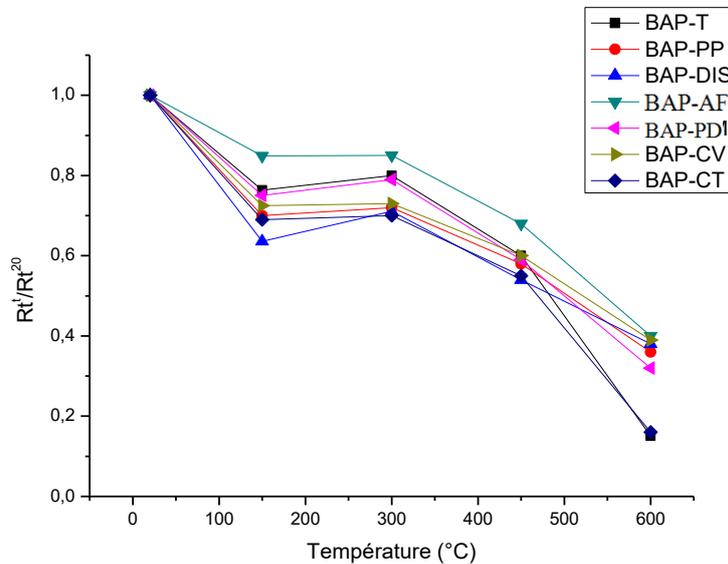


Figure 4-15 Résistance à la flexion résiduelle.

On remarque sur la figure 4-15 que l'effet de la température sur la résistance à la flexion de BAP devient plus important à des températures plus élevées. En effet le développement de la pression interstitielle dans les microstructures des BAP entraîne une perte rapide de la résistance à la flexion. Entre 20°C et 150 °C cette diminution est de respectivement 23,7%, 30%, 15%, 25%, 28% et 31% pour les BAP-T, BAP-PP, BAP-DS, BAP-AF, BAP-PD, BAP-CV, BAP-CT.

Tous les mélanges avec les fibres subissent une diminution très importante de la résistance par rapport au BAP-T. cela est dû à que la fusion et la carbonisation des fibres de polypropylène et des fibres végétales créant des pores supplémentaires. Le BAP-T et le BAP-CT présentent un écaillage explosif à 600°C.

4.2.1.3 Vitesse d'impulsion

Le rapport de la vitesse de propagation résiduelle de tous les bétons autoplaçants après chaque cycle de chauffage est défini sur la figure 4-16.

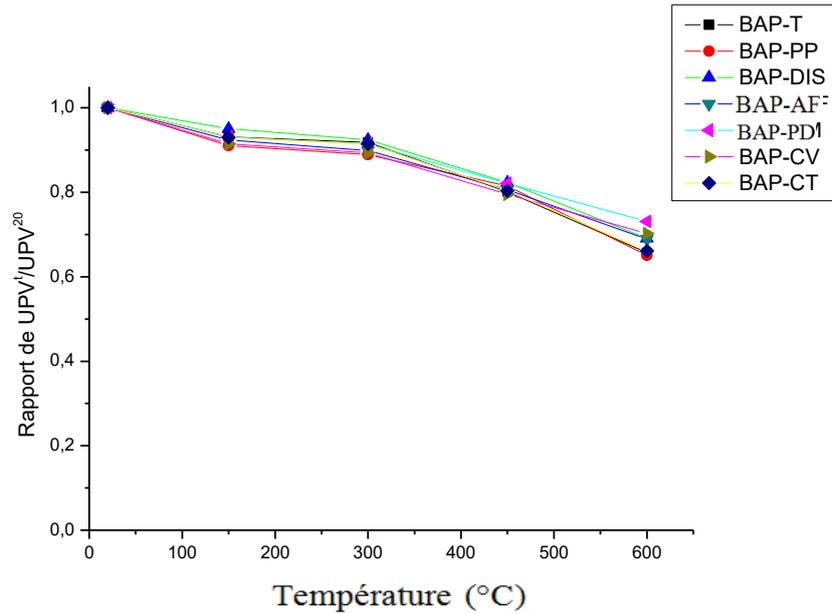


Figure 4-16 Rapport de la vitesse d'impulsion avant et après chaque cycle de chauffage des BAP-T et BAP-F.

Sur la figure 4-16 une diminution de la vitesse d'impulsion (VP) en fonction de l'élévation de la température. Ce qui indique l'apparition des fissures dans les bétons (Sideris et Manita 2013).

On observe que la VP de tous les BAP suit une même réduction. Par conséquent, l'effet des fibres sur la vitesse d'impulsion est négligeable. D'après (Sideris et Manita 2013) ont cité que la décomposition de l'hydroxyde de calcium est la principale cause de la réduction de la VP.

4.2.1.4 Perte en poids

La masse de chaque échantillon a été mesurée avant et après chaque cycle de température. La figure 4-17 présente l'évolution de la perte de masse après chaque cycle de chauffage.

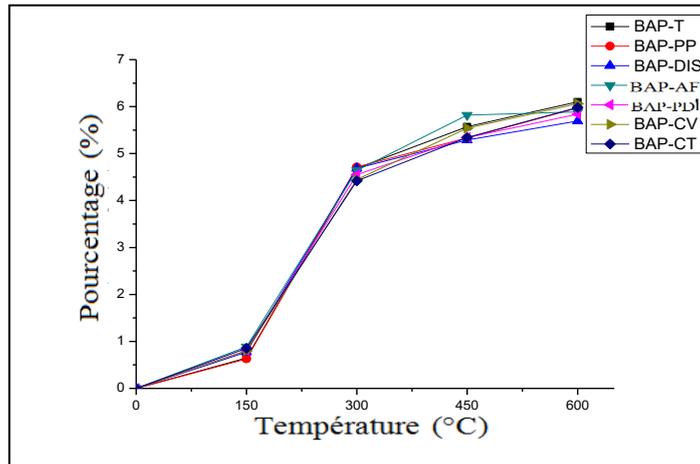


Figure 4-17 Evolution de la perte en poids des BAP des différentes températures.

Nous observons que l'évolution de la perte de masse en fonction de la température est à peu près similaire pour les sept bétons étudiés. On remarque entre 20°C et 150 ° C une variation du poids assez faible dans tous les BAP. Dans ce cas cette perte de masse correspond au départ de l'eau libre contenant dans les pores capillaires. Entre 150 et 300 ° C, on constate une augmentation importante de la perte en poids d'environ 4 et 5% par rapport à la masse initiale. D'après M. K. Tshimanga (Tshimanga 2006) la perte de masse entre 150 et 300 ° C correspond à l'évaporation de l'eau liée. Au-delà de 300 la cinétique de la perte de masse diminue. La perte en poids des BAP fibrés est moyennement plus élevée que les BAP-T.

4.2.1.5 Observation visuelle après traitement thermique

Après le traitement thermique, les échantillons ont été soumis à un examen visuel (figure 4-18).



Figure 4-18 (a) BAP-T et (b) BAP-DS à 600°C.

Dans la figure 4-18 (a) et (b) la couleur de la surface des échantillons a subi des changements importants.

Les BAP-T à 600°C, subissent un écaillage explosif (figure 4-19 (a)). Les BAP-DS restent intacte mis à part quelques fissures superficielles (figure 4-19 (b)).

❖ Analyse thermogravimétrique et différentielle thermique

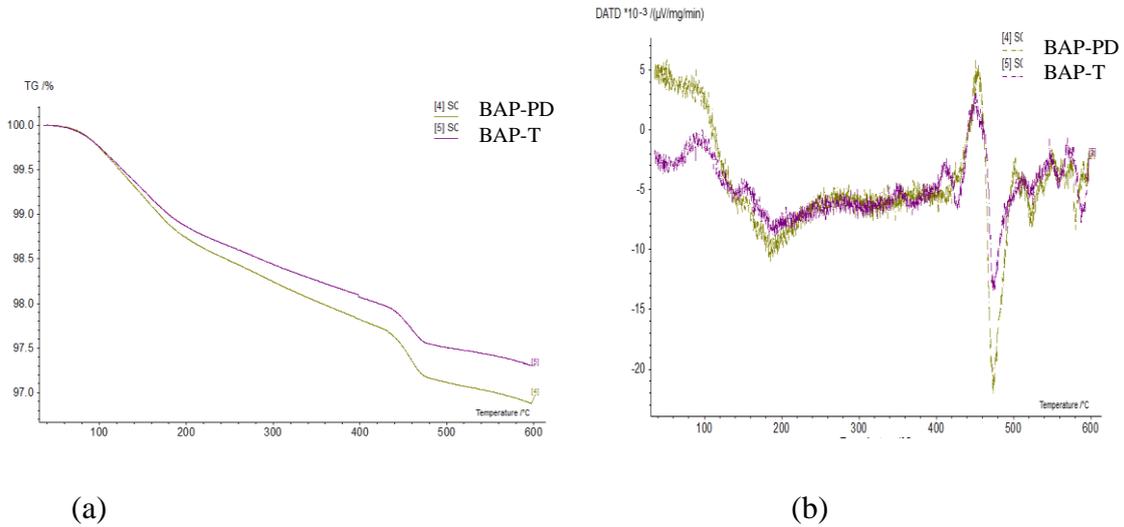


Figure 4-19 Analyse thermogravimétrique (a) et sa dérivée sur les spécimens des BAP-PD et des BAP-T chauffés à 150°C(b).

On constate que la perte en masse des BAP-PD est plus élevée que celle des BAP-T. La décomposition des fibres après l'augmentation de la température (250°C) provoque des vides inter-structuraux et un changement de la perte en masse.

à la température inférieure à 420 ° C la perte de masse est due à l'évaporation de l'eau libre et de l'eau de C-S-H, ettringite, monocarboaluminates hydratés (Z.P. Bažant 1996). On remarque un changement important de la masse entre 410°C et 460°C. Cela est dû à la décomposition de la Portlandite.

La figure 4-19 (b) représente un pic important à 475°C pour les BAP-PD par rapport au BAP-T. ce qui confirme la décomposition des fibres.

4.2.1.6 Conclusion

D'après les résultats précédents on peut conclure que :

- La résistance à la compression résiduelle après chaque cycle de chauffe: les bétons contenant les fibres végétales et les polypropylènes ne subissent pas d'effets d'écaillage. En effet il y a une augmentation de la résistance entre 150-300°C due à la réhydratation des particules du ciment anhydre existant dans le béton. Le rapport de la diminution de la résistance des BAP avec les fibres végétales est plus faible que celui des BAP-T et le BAP-PP. Cette diminution varie selon la nature des fibres et leurs caractéristiques (le diamètre et la longueur).
- La cinétique de la résistance à la flexion est plus rapide que celle de la compression.

En conclusion, l'introduction des fibres végétales (comme l'Alfa, le Dis, le Palmier dattier et le chanvre) dans les bétons autoplaçants présentent un effet positif d'un point de vue économique et technique limitation de l'écaillage des bétons soumis à haute température.

4.2.2 Porosité capillaire

La porosité capillaire est une caractéristique micro-structurale qui influe sur les propriétés de transfert (Hadjoudja 2014).

Les résultats de la porosité des différents BAP-F à l'état durci est donnée sous forme de graphique voir la figure 4-20.

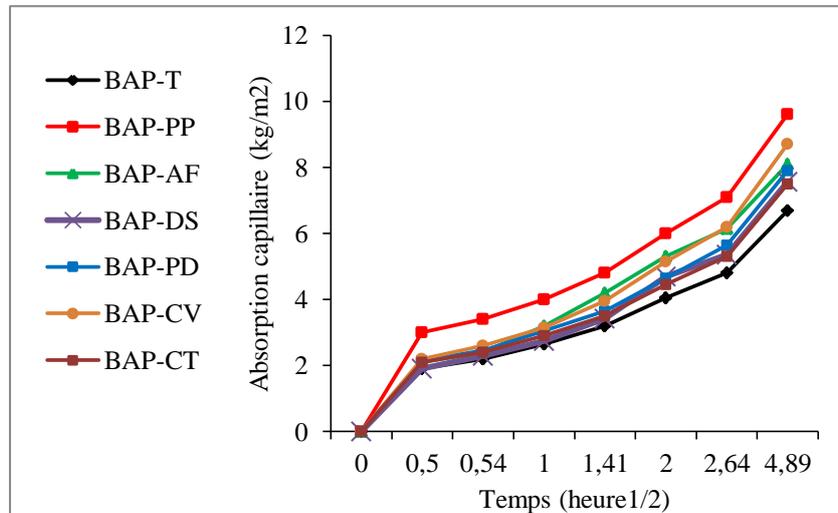


Figure 4-20 Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité.

Dans la figure 4-20 les bétons autoplaçants avec les fibres présentent une absorption capillaire plus élevée que le BAP témoin d'environ 10 à 22%. On remarque aussi que le BAP-PP possède le coefficient d'absorption le plus important.

4.2.3 Attaque sulfatique

4.2.3.1 Résistance à la compression

Nous étudions dans ce paragraphe la durabilité des différents BAP soumis à une attaque de sulfate de sodium Na_2SO_4 a été discutée. Pour cela nous avons effectué des essais de la résistance à la compression sur les spécimens cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. La figure 4-21 montre le degré de la dégradation des BAP après cinq cycles de séchage mouillage.

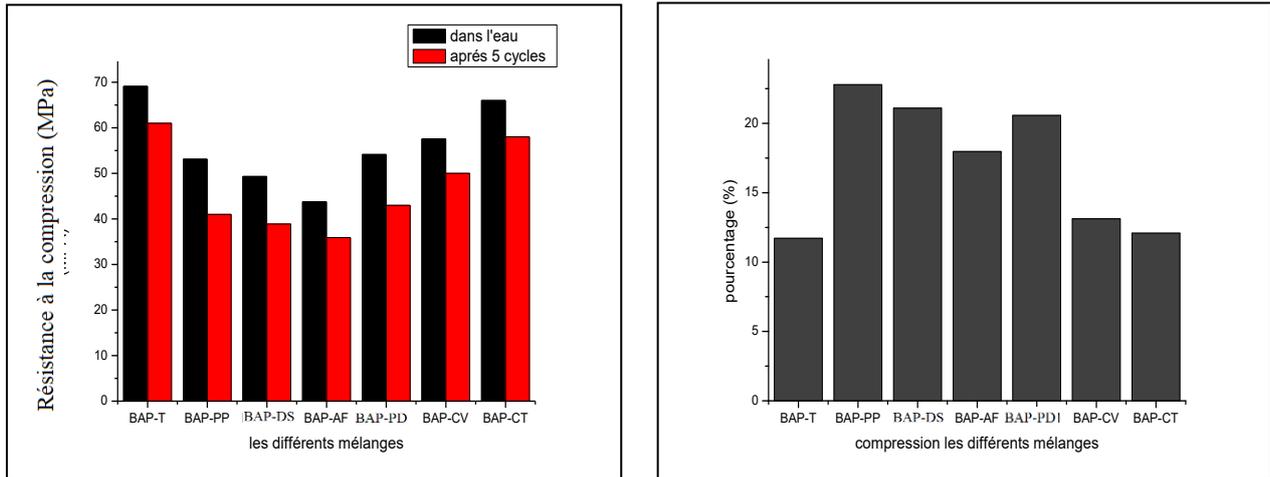


Figure 4-21 Evolution de la diminution de la résistance à la compression des différents types de béton après 5 cycles de séchage mouillage.

Après le cinquième cycle de séchage mouillage une diminution de la résistance à la compression a été remarqué pour tous les mélanges BAP-T, BAP-PP, BAP-DS, BAP-AF, BAP-CV et BAP-CT de 11,7%, 22,8%, 21,1%, 17,9%, 20,5% 13,1% et 12,1% respectivement. Par contre les BAP-CV et BAP-CT présentent la même diminution au béton témoin. On conclut que les fibres végétales sont sensibles au cycle séchage mouillage. Cela s'explique probablement par la porosité élevée des BAP fibrés (BAP-F) qui facilite le phénomène de la diffusion de l'eau sulfatée à l'intérieur du béton.

Les chercheurs (Ardanuy, Claramunt et al. 2011) (de Almeida Melo Filho, de Andrade Silva et al. 2013) ont montré, à l'aide d'une diffraction des rayons X (XRD) et la technique d'analyse thermogravimétrique (TGA) que la migration des produits d'hydratation des matériaux cimentaires renforcés de fibres végétales suit le processus suivant:

- (a) dans le premier cycle de séchage la section transversale des fibres végétale est réduite en raison de la perte d'eau. Cette réduction entraîne une perte d'adhérence avec la matrice, d'où l'apparition des vides à l'interface fibre-matrice;
- (b) dans le cycle de mouillage, l'eau dissout les composant de l'hydratation du ciment (hydroxyde de calcium). Les fibres végétales absorbent cette dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquant une dégradation de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine des fibres;
- (c) dans le deuxième cycle de séchage, l'eau est évaporée et la portlandite précipitée sur les surfaces de fibres.

D'autre explications donnée par les (Pacheco-Torgal et Jalali 2011) montrent que la capacité d'absorption d'eau par des fibres végétales est une autre façon de diminuer la durabilité du béton. Cette absorption conduit à des changements de volume provoquant des fissures microstructurales.

4.2.3.2 Résistance à la flexion

La figure 4-22 montre la variation de la résistance à la flexion des différents types de bétons après cinq cycles séchage mouillage.

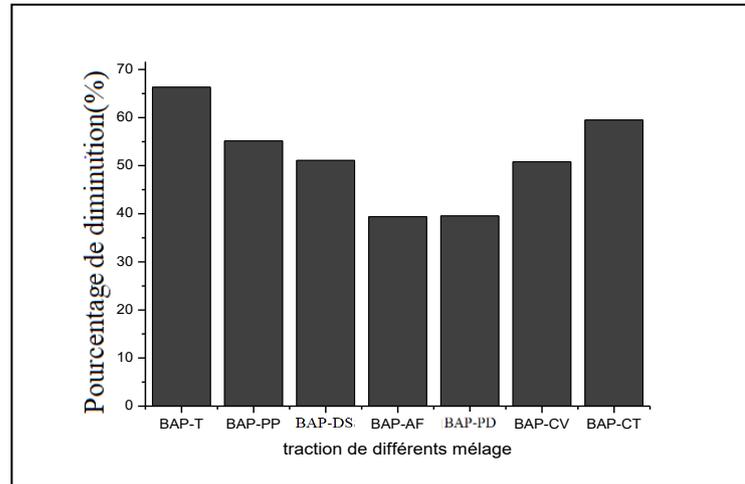


Figure 4-22 Evolution de la résistance à la traction par flexion des différents types de béton après 5 cycles de séchage de mouillage.

A partir de la figure 4-22 on constate une diminution remarquable de la résistance de tous les mélanges soumis à l'attaque sulfatique combiné avec des cycles de séchage mouillage. On distingue une réduction de 66%, 59% 76% pour les BAP-T, BAP-CT, BAP-CV respectivement par rapport aux mélanges conservés dans l'eau. La résistance à la flexion est plus sensible à ce phénomène que la résistance à la compression. On remarque aussi que le BAP-T présente une diminution plus importante que celle des autres BAP-F. Cette constatation est l'inverse que celle observée pour résultats de la résistance à la compression. Ce qui montre la difficulté de ce phénomène.

On conclut que les fibres végétales conduisant une bonne résistance à la flexion que le BAP-T.

4.2.3.3 *Variation dimensionnelle et pondérale*

L'importance de l'évolution du volume d'eau dans les bétons pendant les cycles séchage mouillage dans les sulfates, nous a poussés à approfondir nos recherches, en réalisant des essais de variation dimensionnelle et de poids. La figure 4-23 représente la variation dimensionnelle après chaque cycle de séchage mouillage de différents mélanges étudiés.

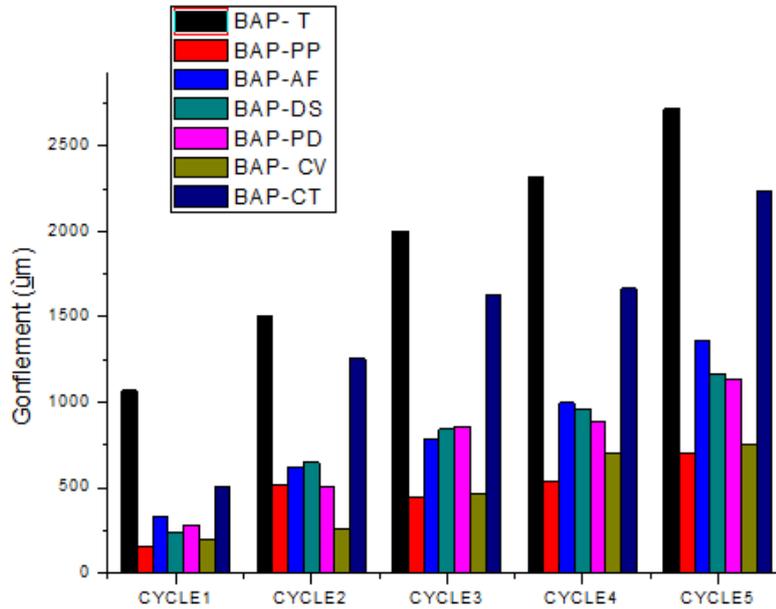


Figure 4-23 Evolution de la variation dimensionnelle de différents BAP-F pendant cinq cycles.

A partir de la figure 4-23 on constate que la variation dimensionnelle augmente relativement avec les cycles de séchage/mouillage. On remarque que le BAP-T subie un gonflement important par rapport aux autres BAP-F. Ceci s'explique par la présence des fissures internes et externes, facilitant le transfert de l'eau sulfatée dans les bétons. Par contre les fibres de polypropylène et chanvre ont montré des valeurs plus basses que les autres mélanges. Cela est dû probablement aux fibres qui maintiennent la cohésion des grains de béton en formant un réseau de fibre.

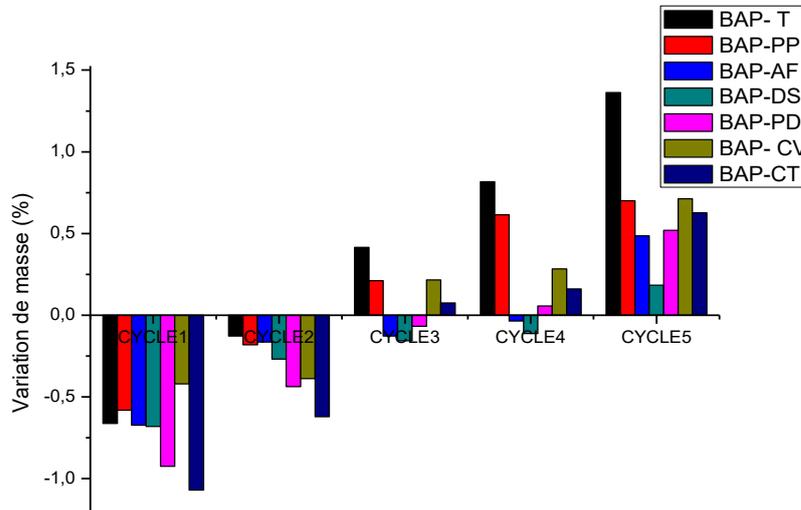


Figure 4-24 Evolution de la perte en poids de différents BAP-F après cinq cycles.

On observe à partir de la figure 4-24 une perte de masse pendant les deux premiers cycles en particulier pour les BAP-CT et BAP-T. Par contre après le troisième cycle, on constate un gonflement considérable pour tous les mélanges. Le BAP-T présente un gain de poids plus remarquable que celui des BAP-F. Cela suppose qu'il y a le même principe de la variation dimensionnelle.

4.2.3.4 Vitesse d'impulsion

A partir de la figure 4-25 on constate que la vitesse d'impulsion (VP) des BAP diminue après l'essai de vieillissement. Cette diminution varie selon le type de mélange. La plus faible vitesse est celle des BAP-AF et des BAP-PD. En générale cet essai donne une explication concernant les performances mécaniques.

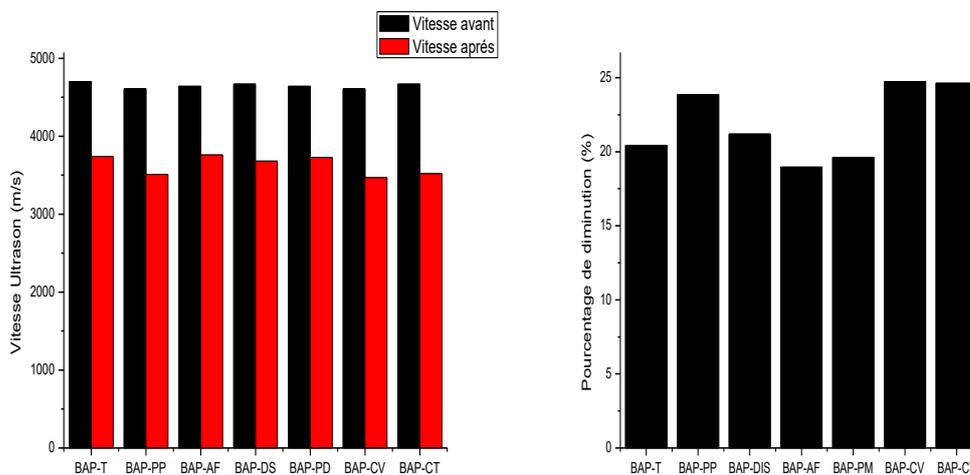


Figure 4-25 Vitesse d'impulsion de différents mélanges.

4.3 Conclusion

L'étude menée dans le présent chapitre vise à contribuer à mieux comprendre le comportement de diverses natures de fibres végétales dans les bétons autoplaçants. Elle vise également à rependre à la possibilité de réaliser un béton autoplaçant contenant des fibres végétales ayant une bonne ouvrabilité.

Ainsi, nous avons effectué une investigation expérimentale contenant sept formulations de bétons autoplaçants : BAP-T, BAP-PP, BAP-DS, BAP-AF, BAP-PD, BAP-CV et BAP-CT. Le dosage en fibre était fixe 2 kg/m^3 . Tous les essais de la caractérisation des BAP à l'état frais ont été réalisés. Pour les propriétés à l'état durci on a déterminé la résistance à la compression, à la flexion, la porosité capillaire, le comportement à l'élévation de la température, la variation dimensionnelle sous une charge constante et la durabilité dans un milieu de sulfate de sodium. Pour bien déterminer l'influence de ces différentes fibres végétales dans les BAP à court et à long terme. Les conclusions suivantes sont tirées sur la base des résultats des différents tests et d'analyses:

- ✓ Pour la qualification d'un béton d'autoplaçant avec des fibres végétales à l'état frais, une augmentation d'eau et de superplastifiant, est nécessaire.
- ✓ La densité humide et la teneur en air dans les BAP-FV sont presque similaire à celle du BAP-T. Cela est probablement dû à la légèreté des fibres.
- ✓ L'évolution de l'ouvrabilité des BAP fibrés diminue en fonction de la nature des fibres, particulièrement en milieux confinés. Sachant que ces résultats restent dans la fourchette de la norme (AFGC 2000).
- ✓ Les résistances à la compression et à la flexion des BAP-F sont plus faibles que les BAP-T. Néanmoins les résultats oscilleront dans la même fourchette qu'un béton structural. Par contre les BAP-PD, BAP-AF et BAP-DS ont montré à long terme une chute de résistance considérable. Cela est dû à la dégradation des fibres végétales dans le milieu alcalin de ciment.
- ✓ Les bétons avec les fibres sont sensibles aux cycles séchages mouillages.
- ✓ Concernant le comportement à haute température les BAP-F ont présenté une bonne performance mécanique par rapport au BAP-T.
- ✓ L'introduction des fibres diminue le retrait particulièrement pour le BAP-CV et BAP-PP.

En conclusion l'incorporation des fibres végétales comme renfort écologique dans les BAP présentent des caractéristiques à l'état frais et à l'état durci comparable au BAP-T. Dans cette étude on a confirmé qu'on peut réaliser des BAP avec les fibres végétales.

Dans le chapitre suivant nous étudierons le cas des fibres végétales traitées et incorporées dans les matériaux cimentaires à base de metakaolin.

Chapitre 5

Etude des propriétés et de la durabilité des mortiers pouzzolanique contenant des fibres végétales

5.1 Introduction

Les fibres végétales constituent une option très intéressante pour l'industrie de la construction. Le travail suivant s'intéresse aux performances mécaniques et à la durabilité des mortiers cimentaires à base de métakaolin renforcés par des fibres végétales.

5.2 Performances mécaniques

5.2.1 Résistance à la compression

La figure 5-1 montre l'évolution de la résistance à la compression des mortiers selon différentes échéances (7, 28 et 90 jours).

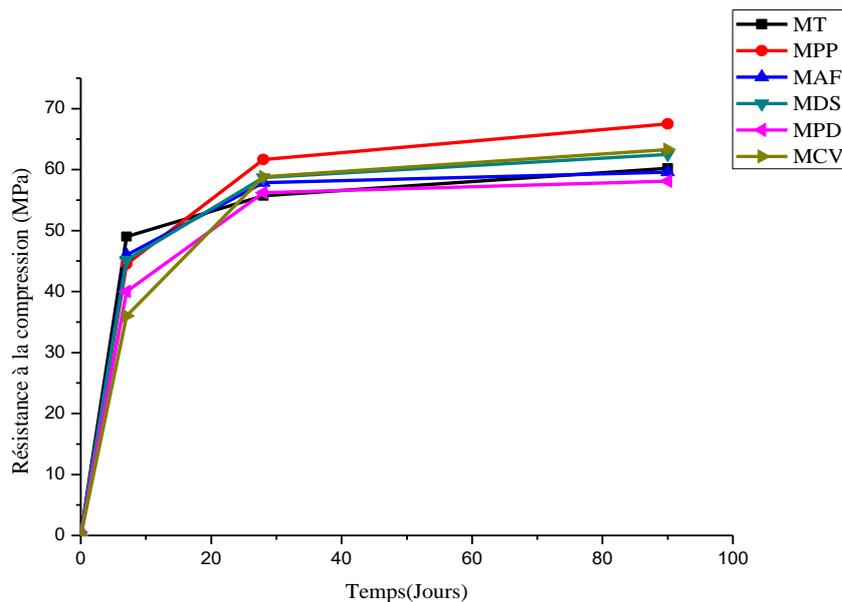


Figure 5-1 Evolution de la résistance à la compression des mortiers.

On remarque à 7 jours les mortiers fibrés (MF) révèlent des valeurs plus faibles que le mortier témoin sans fibre (MT). Les chercheurs (Mo, Bong et al. 2017) ont expliqué cette diminution par la présence des fibres dans les mortiers cimentaires qui provoque des porosités supplémentaires au niveau de l'interface fibre/matrice. A 28 jours on constate que tous les mortiers avec fibres donnent des résistances légèrement élevées que le MT en particulier le MPP. Cela peut s'expliquer par le dosage optimal des fibres choisies (0,1% par rapport au volume total). De plus, cette augmentation de la résistance est probablement revient à la limitation des fissures dans les mortiers fibrés lors de l'écrasement (voir la figure 5-2).

La figure 5-2 présentera l'aspect visuel des spécimens de mortiers après l'écrasement.

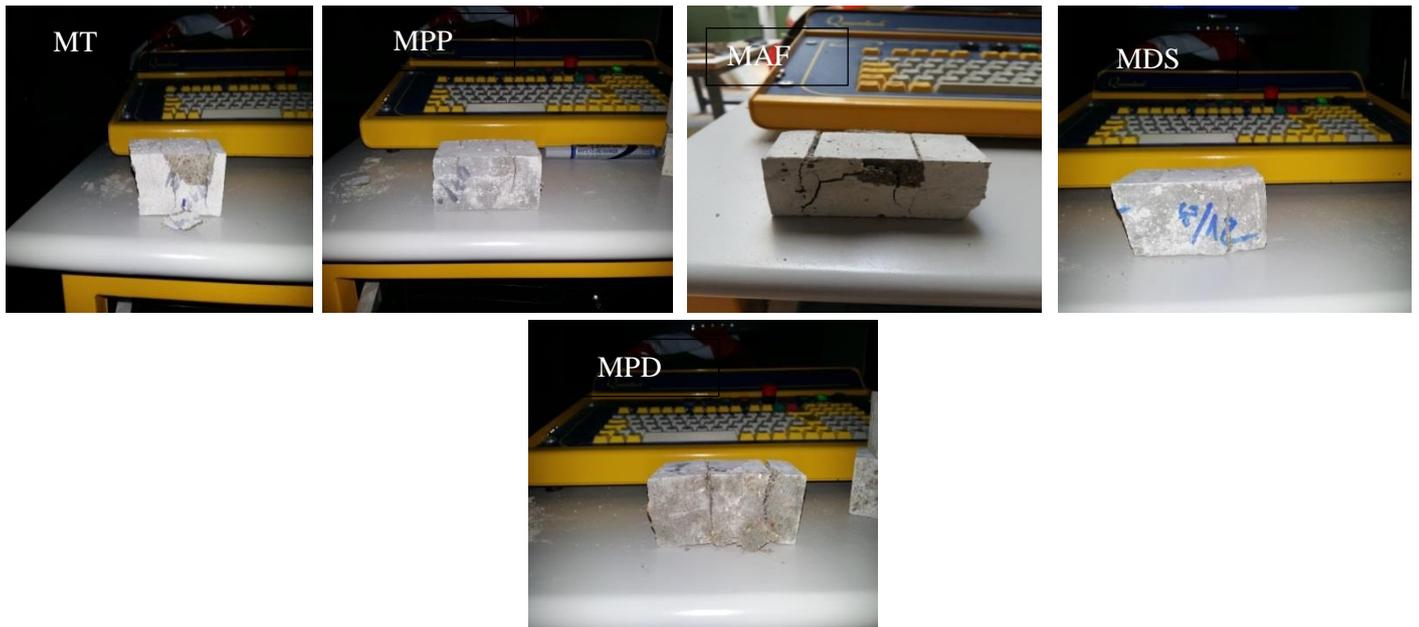


Figure 5-2 Observation visuelles après l'essai de compression des différents échantillons effectués.

Après écrasement on remarque que les mortiers avec fibres restent intacts à la différence du MT. Ce dernier présente une détérioration remarquable.

En conclusion les fibres sont efficaces pour la cohésion des matériaux cimentaires après l'écrasement.

5.2.2 Résistance à la flexion

La figure 5-3 montre l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers selon différentes échéance (7,28 et 90 jours).

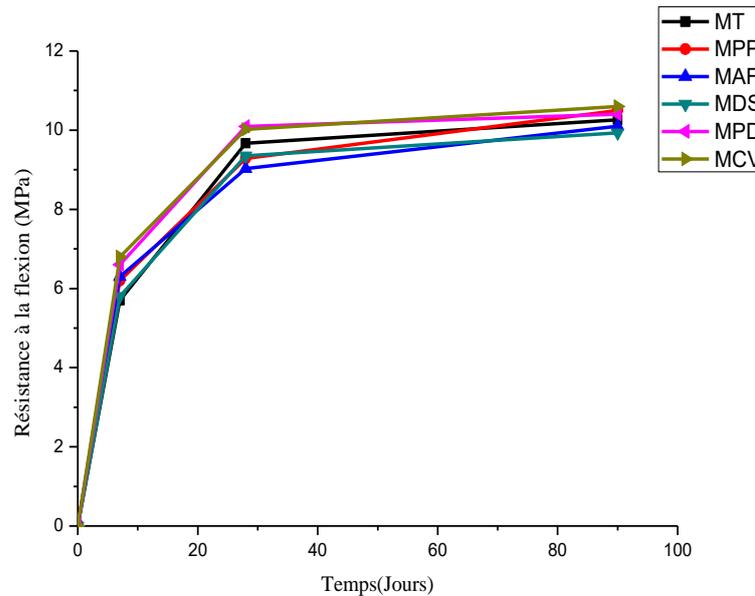


Figure 5-3 Evolution de la résistance à la flexion des mortiers.

D'après la figure 5-3 on remarque que les mortiers avec fibres MPP, MAF, MDS, MPD et MCV à 7 jours montrent une résistance à la flexion plus élevée que le MT 7,12%, 8,15% 1,55% 12,05% et 14,75% respectivement. Par contre après 28 jours on constate que les MPD et MCV donnent les meilleurs résultats par rapport à tous les autres mélanges. Les MFA, MPP et MCV montrent des résistances quasiment similaires au MT.

On conclut que les fibres végétales traitées révèlent un bon comportement dans les mortiers à base de metakaolin. Ces fibres améliorent la résistance à la flexion au jeune âge et à long terme, en particulier pour les fibres de palmier dattier et de chanvre.

On explique le mécanisme de l'effet des fibres dans les mortiers par les travaux de N. Banthia and J. Sheng (Banthia et Sheng 1996) ont montré que la liaison interfaciale entre les fibres de polypropylène et la pâte de ciment est faible en raison de leur surface lisse. De plus, le polypropylène est chimiquement inerte et hydrophobe, ce qui élimine la possibilité d'une liaison chimique. Cependant, la fibrillation a un effet considérable sur la liaison (Toledo Filho, Scrivener et al. 2000). Quant aux fibres végétales, on remarque qu'elles donnent des meilleures performances mécaniques à 28 jours. Ceci est due à sa surface rugueuse qui améliore l'interaction entre les fibres et la matrice (de Almeida Melo Filho, de Andrade Silva et al. 2013) (Mouhoubi, Osmani et al. 2012).

5.2.3 Capacité de déformation

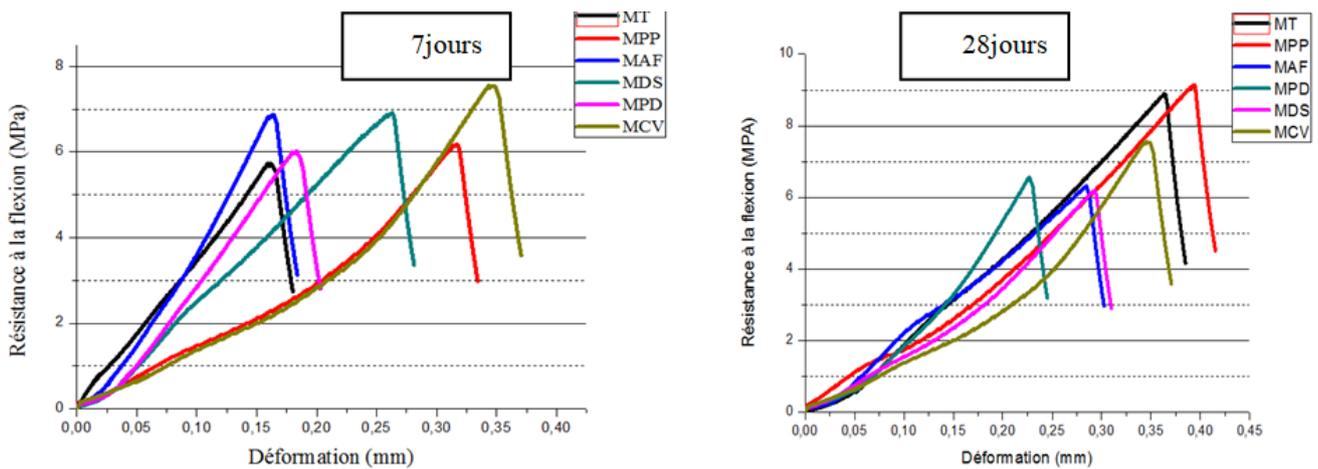


Figure 5-4 Courbe contrainte-déformation.

On peut constater à partir de la figure 5-4 que les mortiers avec les fibres végétales (FV) présentent une meilleure capacité à la déformation que les mortiers sans fibre en particulier les MPD et MCV. A 7 jours la résistance en flexion des MF est plus élevée que celles des MT d'environ de 12 %. Ceci est dû à la bonne résistance à la traction des fibres végétales (figure 3-3). De plus, le traitement subit par les fibres leur confère une bonne adhérence à la matrice cimentaire.

L'observation au MEB des mortiers à 20°C (figure 5-15) montre que les fibres végétales restent intactes à long terme. Elie Awada et al (Awwad, Mabsout et al. 2012) ont trouvé une augmentation de la résistance en flexion de 15-30 % pour les mélanges avec 0,5% de fibre de chanvre. Kriker et al (Kriker, Debicki et al. 2005) ont montré que l'introduction de 3,2% de fibres de palmier dattier dans le béton améliore la résistance à la flexion et les coefficients de la ténacité après fissuration. À 28 jours, on constate une augmentation de la résistance en flexion pour tous les mortiers. Néanmoins, celle des MDS et MAF est légèrement moins importante que celle des MT. Ceci est probablement dû au diamètre de ces fibres qui est plus grand que les autres, provoquant des microfissures à l'intérieur du matériau.

Ainsi, on peut dire que le traitement chimique avec l'hydroxyde de calcium et l'addition de 30% de metakaolin sont bénéfiques pour la durabilité des fibres dans les matériaux cimentaires.

5.3 Propriétés de transfert

5.3.1 Conductivité thermique

On va évaluer la possibilité d'utiliser les fibres végétales dans les matériaux cimentaire afin d'améliorer l'isolation thermique dans les constructions. La figure 5-5 montre l'évolution de la conductivité thermique pour tous les mélanges.

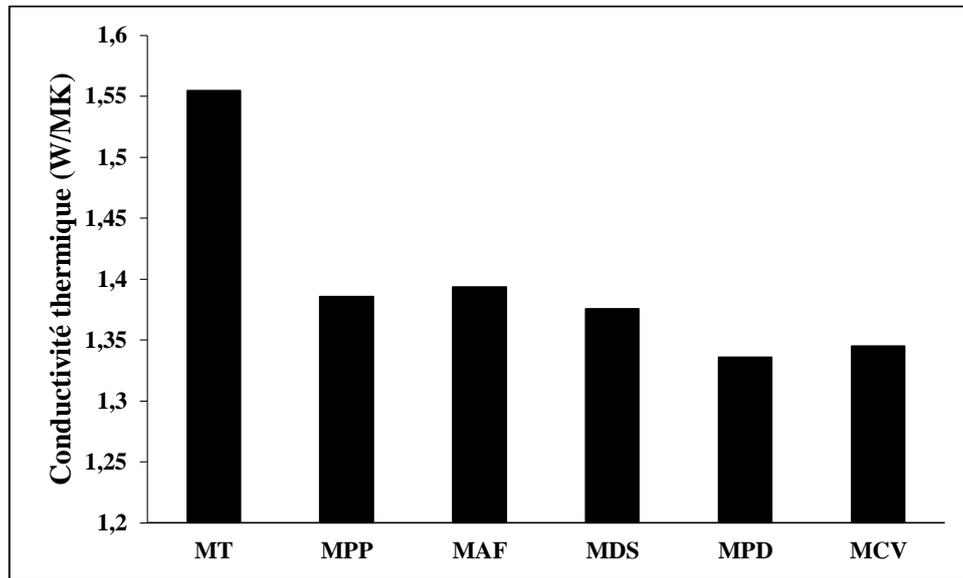


Figure 5-5 Conductivité thermique des différents mortiers utilisés.

On observe que l'ajout des fibres végétales ou synthétiques dans les mortiers diminue la conductivité thermique. Malgré le faible dosage des fibres ajouté, on remarque une réduction de cette conductivité d'environ de 15%. Cette diminution est attendue parce que les fibres ont une conductivité thermique faible par rapport à celle de la matrice cimentaire (Raut et Gomez 2016, Mo, Bong et al. 2017). De plus, l'incorporation des fibres dans le composite tend à générer une porosité supplémentaire dans la matrice, par conséquent la densité est diminuée. En générale la conductivité thermique des mortiers cimentaires est comprise entre 2 et 2,5W/mK. Or, les valeurs obtenues dans cette étude varient entre 1,3 et 1,5 W/mK. Selon Kim Hung Mo et al (Mo, Bong et al. 2017) les mortiers qui contiennent un pourcentage élevé de metakaolin présentent plus de vides à cause de la réaction pouzzolanique tardive.

Tous nos mélanges à base de fibres présentent des valeurs quasiment similaires. Ainsi, On peut conclure que la nature des fibres n'influe pas beaucoup sur la conductivité thermique.

5.3.2 Porosité accessible à l'eau

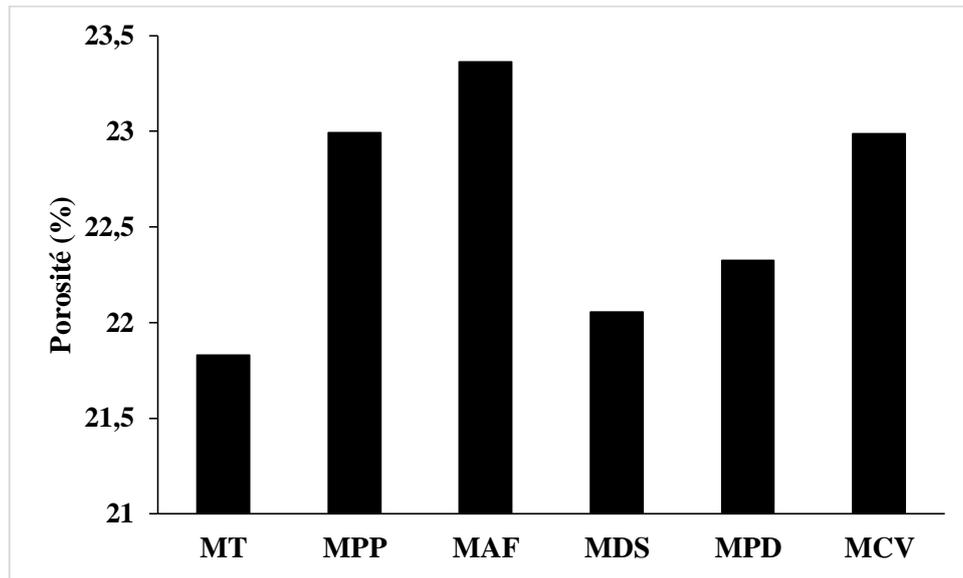


Figure 5-6 Porosité à l'eau des différents mortiers étudiés.

La figure 5-6 montre que les valeurs de la porosité des mortiers fibrés supérieures à celles des MT. Ces valeurs varient entre 21 et 23 % pour les MT et MF respectivement. On observe aussi que la porosité change en fonction de la nature des fibres. Les MAF et les MPP présentent une absorption élevée par rapport à celle des autres MF. On conclut que l'introduction des fibres dans les mortiers crée des pores supplémentaires.

5.3.3 Densité

La densité est un facteur important pour déterminer la porosité et évaluer la durabilité des mortiers cimentaires.

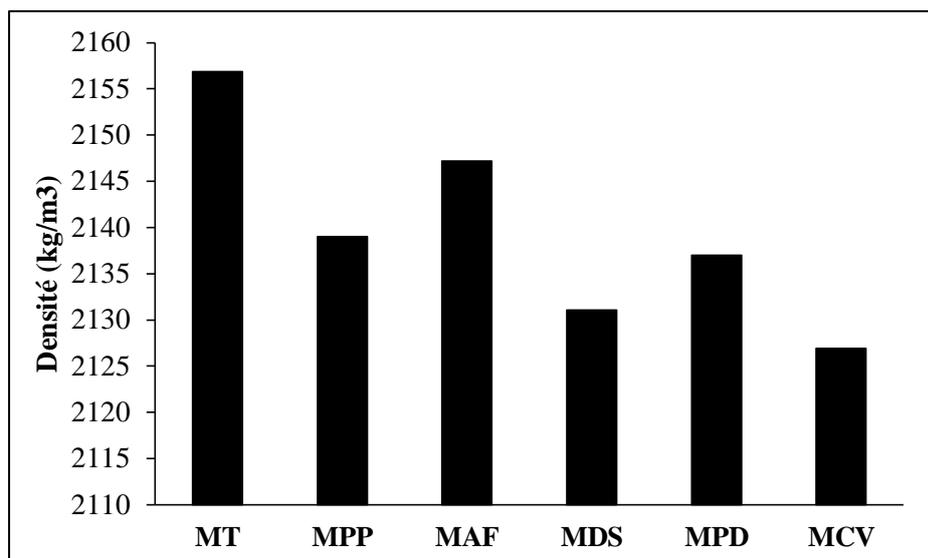


Figure 5-7 Densité de différents mélanges.

On constate que la présence de 0,1% de fibres dans les mortiers diminue légèrement la densité. On remarque aussi que le MCV présente une faible densité par rapport aux autres mortiers.

5.3.4 Perméabilité au gaz

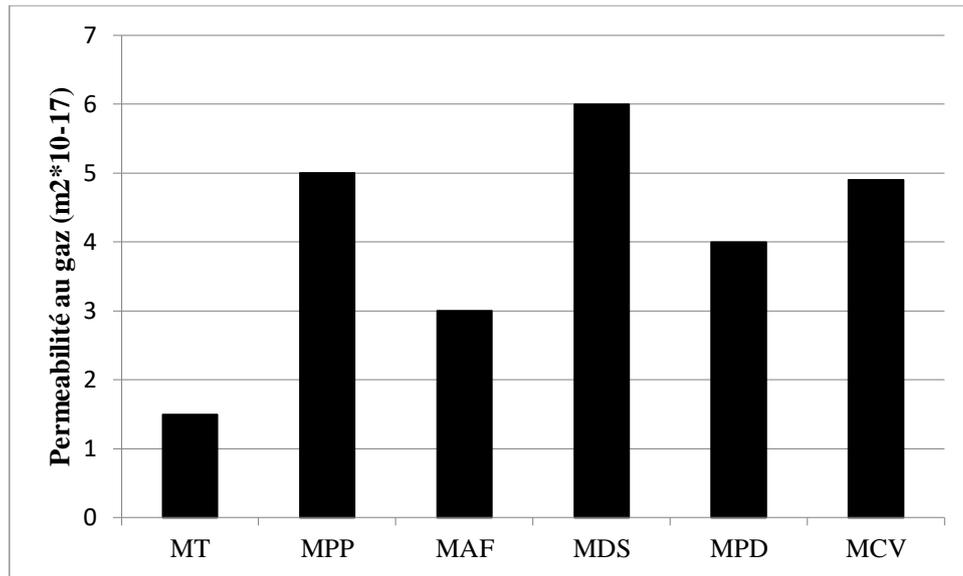


Figure 5-8 Perméabilité au gaz des mortiers.

Dans la figure 5-8 on constate que les valeurs de la perméabilité de MT sont plus faibles que les MF. Ces résultats confirment ceux liés à la porosité accessible à l'eau. MDS présente la valeur la plus élevée de tous les mélanges.

5.3.5 Module dynamique

La vitesse de l'impulsion ultrasonique (VP) est utilisée pour évaluer et confirmer quantitativement la résistance à la compression.

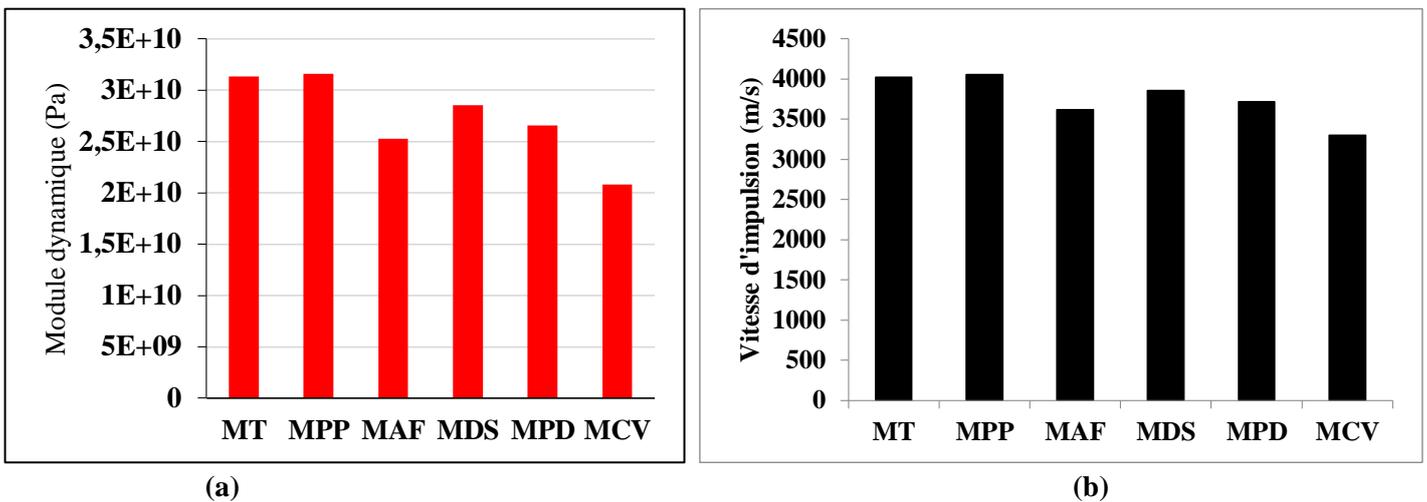


Figure 5-9 (a) Module dynamique des différents mortiers étudiés (b) vitesse d'impulsion.

On a trouvé que l'incorporation des fibres dans les mortiers quel que soit leur type diminue légèrement la vitesse d'impulsion (VP) et le module dynamique (Ed). Les MCV (mortier de chanvre) montrent la plus faible d'Ed et VP.

5.4 Durabilité des mortiers

5.4.1 Carbonatation

5.4.1.1 Profondeur de carbonatation

Le dioxyde de carbone de l'atmosphère peut réagir avec le ciment hydraté en présence d'humidité. Cette réaction affecte à la fois la microstructure du ciment et la durabilité du béton armé. La détermination de la résistance d'un mortier cimentaire à la carbonatation passe par la mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée à une ou plusieurs échéances. Les profondeurs carbonatées sont déterminées selon le mode opératoire (NF EN 18-458, X). Dans notre étude, les mesures de ces profondeurs ont été relevées à 28 et 52 jours de conservation dans l'enceinte de carbonatation.

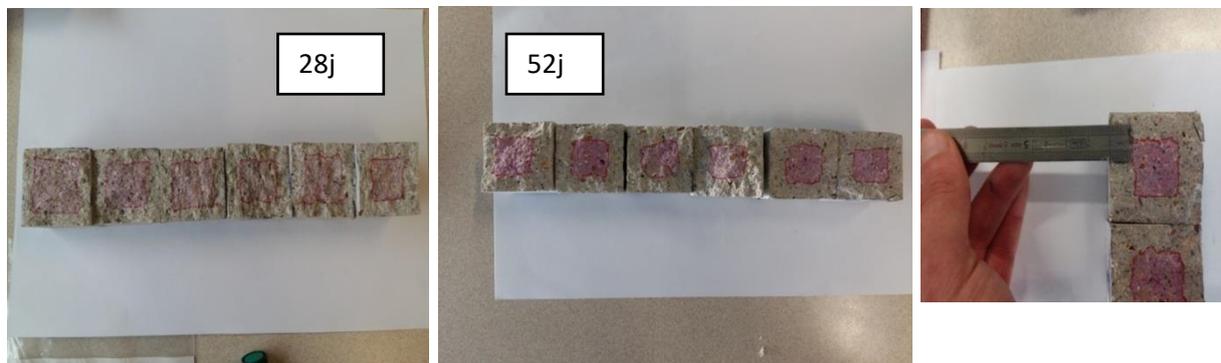


Figure 5-10 Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone dégradée (grise, non colorée).

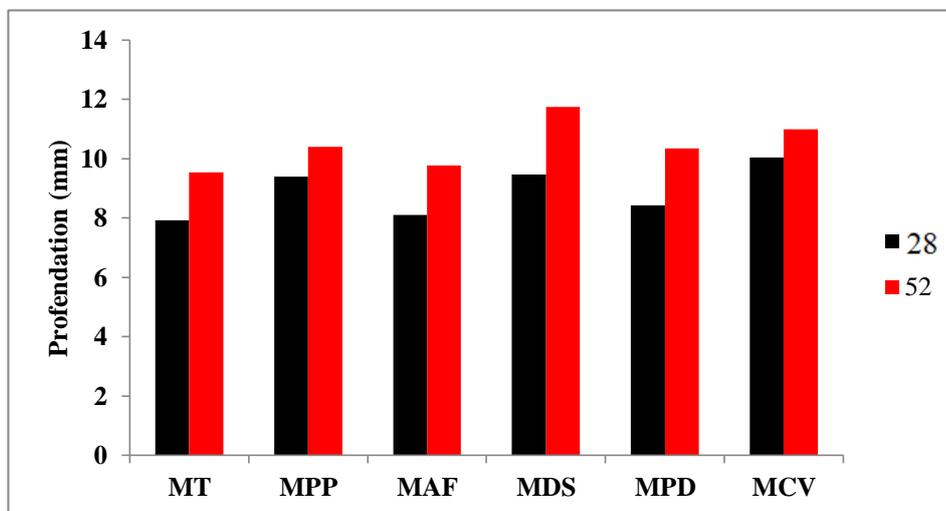


Figure 5-11 Profondeur de carbonatation des différents mélanges.

Les profondeurs de la carbonatation accélérée des mélanges de mortiers après 28 et 52 jours sont présentées dans la figure 5-11. On remarque que l'introduction des fibres dans les mortiers augmente la surface carbonatée jusqu'à 20%. Ces résultats sont en contradiction avec ceux des travaux de H Mohammadhosseini et al (Mohammadhosseini, Yatim et al. 2016). Ces auteurs ont trouvé que l'ajout de fibre de tapi avec des taux de 0,25%, 0,5% et 0,75% dans le béton diminue la profondeur de carbonatation. Les chercheurs Zhang et Li (Zhang et Li 2013) ont montré aussi que l'addition des fibres de Polypropylène dans les bétons diminue la pénétration de CO₂.

Dans notre cas l'augmentation de la profondeur est due principalement à la création des vides supplémentaires à l'interface fibre-matrice. Ces vides provoquent une augmentation de la porosité. Ainsi cette dernière facilite la pénétration du CO₂ dans le matériau. Les MCV et MDS donnent les valeurs plus élevées, à cause de leur porosité élevée (la figure V.6). Après 52 jours, d'exposition au CO₂ la profondeur augmente de 17, 9,5, 17, 19, 18,5, 8,5 % respectivement pour MT, MPP, MAF, MDS, MPD et MCV par rapport à celle mesurée à 28 jours. On constate que les MCV et MPP présente la plus faible variation par rapport aux autres mortiers. Ces résultats ont été confirmés par la DTG (figure. 5-14).

On observe aussi que tous les mélanges présentent des profondeurs élevées. Ceci peut être expliqué par la faible quantité de Ca(OH)₂ dans les mortiers à cause de la présence de metakaolin. Par conséquent, il peut avoir un risque potentiel de carbonatation plus rapide dans ces mortiers. Il existe une similitude entre les résultats obtenus dans notre étude et les résultats obtenus par de Shi et al. (Shi, Xu et al. 2009) qui ont montré que la cendre volante augmente la profondeur de carbonatation du béton.

5.4.1.2 Evolution de la masse des mortiers carbonatés

La figure 5-12 montre l'évolution de la masse des différents mortiers conservés dans l'enceinte de carbonatation.

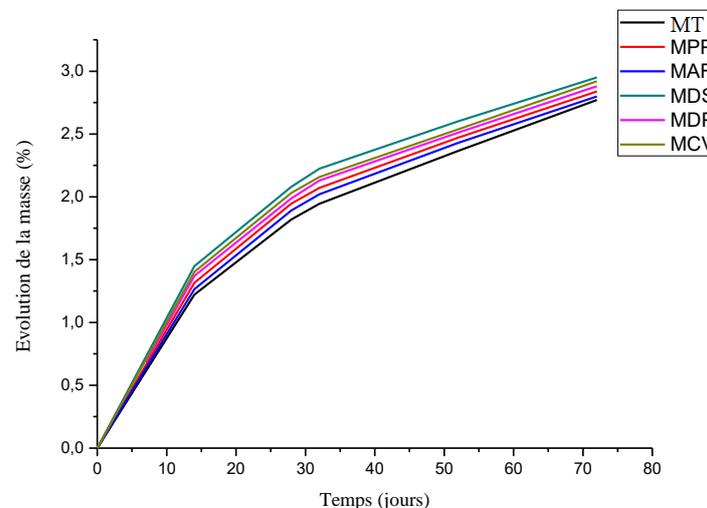


Figure 5-12 Evolution de la masse des différents mortiers carbonatés en fonction du temps.

La figure 5-12 montre que le gain de masse des mortiers fibrés est plus élevé que celui du MT. En générale les mortiers renforcés par des fibres sont plus sensibles à la carbonatation du fait de l'augmentation de la porosité à l'interface fibre / matrice. Ainsi la carbonatation de la pâte de ciment provoque également une perte de connectivité des pores. Ce phénomène de gonflement est expliqué par le changement de phase des produits d'hydratation (dissolution et précipitation). La réaction entre le dioxyde de carbone et la portlandite entraîne une augmentation nette du volume avec une précipitation du carbonate de calcium dans le réseau poreux. Dans notre cas la DTG (figure 5-14) montre que le pic de la portlandite est disparu. Cette disparition est due à la réaction pouzzolanique entre le metakaolin et l'hydroxyde de calcium. Ainsi, la cause principale du gonflement de la structure des pores est associée à la formation du CaCO_3 en raison de la décomposition de C-S-H et l'ettringite. Les MCV et MDS présentent les plus fortes valeurs par rapport aux autres mélanges. Ces résultats corroborent les valeurs de profondeur. Le gain de masse est important dans les 15 premiers jours, ensuite sa cinétique diminue. Ce phénomène peut être relié à la réduction de la quantité des produits d'hydratation comme les CSH et l'ettringite.

5.4.1.3 Porosité

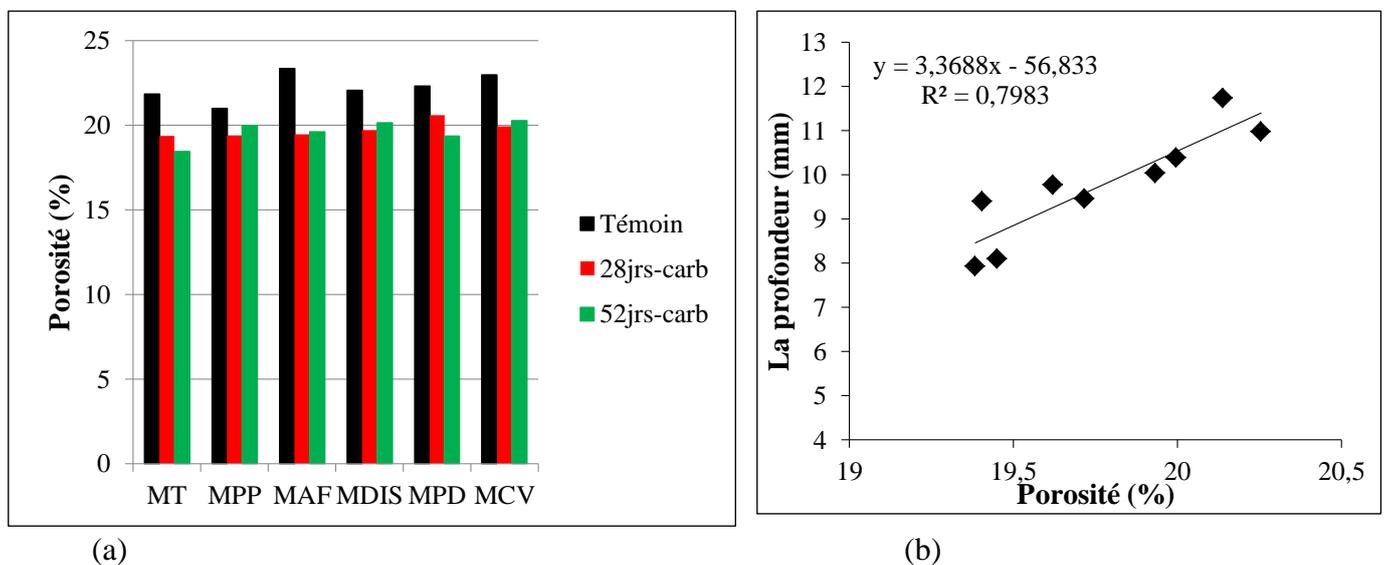


Figure 5-13 (a) Evolution de la porosité accessible à l'eau des différents mélanges, (b) relation entre la porosité et la profondeur de carbonatation.

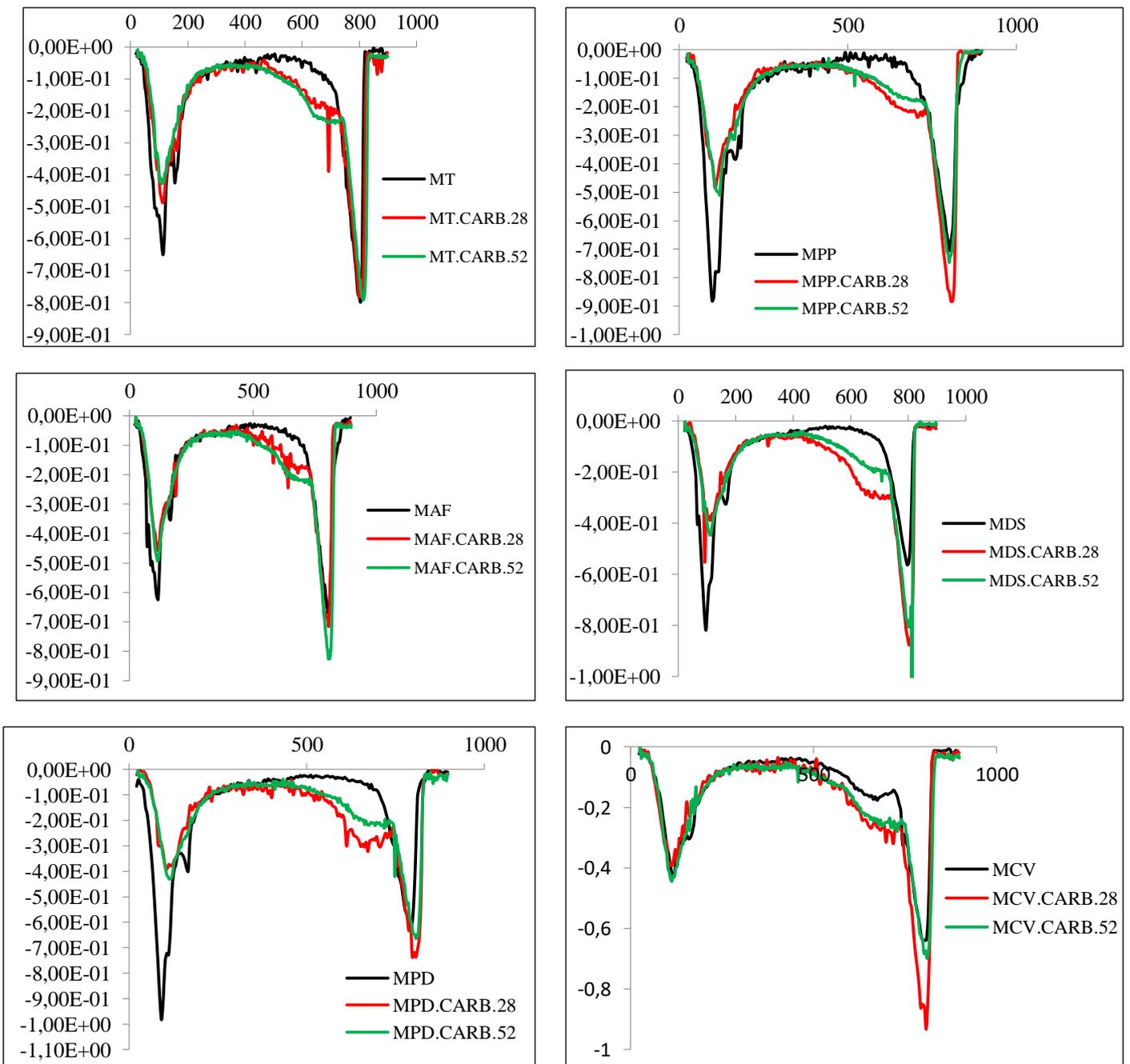
La figure 5-13 montre que la porosité des mortiers après 28 jours de conservation dans l'enceinte de carbonatation est diminuée significativement. En effet, cette diminution est de 7, 8, 11, 12, 17 et 13% respectivement pour les MPP, MPD, MT, MDS, MAF et MCV.

La réaction de dioxyde de carbone avec les produits de l'hydratation (portlandite, CSH et ettringite) entraîne une augmentation nette du volume du matériau (Mohammadhosseini, Yatim et al. 2016). Cette augmentation du volume est due à la précipitation du carbonate de calcium dans le réseau poreux. Ce remplissage des pores peut être associé aussi à la formation du gel de silice supplémentaire en raison de la décomposition de C-S-H. Après 52 jours on constate une légère augmentation de la porosité pour tous les mortiers à base de fibres. Par contre le témoin subi une légère diminution. Cette variation de la porosité à cet âge est due à la création des microfissures dans le matériau provoqué par la précipitation énorme de CaCO_3 solide dans les pores. Cette précipitation provoque une pression interne dans les

mortiers. Ces résultats sont confirmés par Silva et al (Da Silva, Helene et al. 2009) qui ont montré une diminution de la porosité des mortiers de 15% à 33% dans les premières semaines. Puis une augmentation de 15-27% est observée à 6 semaines et une stabilisation à 3 mois. On explique la variation entre les résultats des mortiers fibrés et ceux non fibrés par les vides supplémentaires existant dans les MF, ajoutés aux microfissures à cause de CaCO_3 . C'est pour cette raison que les MF révèlent une augmentation de la porosité plus que les MT. On constate que la figure 13(b) présente une bonne corrélation entre la profondeur de la carbonatation et la porosité avec un coefficient $R^2=0,8$.

5.4.1.4 Analyse thermogravimétrique

La figure. 5-14. représente les résultats de l'analyse thermogravimétrique des échantillons MT et MF non carbonatés et carbonatés à 28 et 52 jours.



Cette analyse thermogravimétrique confirme bien les résultats de la profondeur de carbonatation et le gonflement de masse de nos mortiers. A 140 °C, la présence d'un pic indique la déshydratation et la décomposition du gel de Tobermorite. L'effet de l'incorporation des fibres est principalement significatif aux températures comprise entre 100 et 250 ° C avant la fusion et la carbonisation (Noumowe 2005) (Shatat 2016).

On remarque qu'à la température de 100°C le pic des mortiers fibrés carbonatés diminue considérablement. Alors qu'à 850°C un grand pic est constaté. Concernant les MT une légère diminution de pic de 100°C avec une petite augmentation à 850°C. Ces constatations confirment la profondeur de la carbonatation élevée des mélanges fibrés. Ce phénomène est expliqué par les travaux de H.-s. Shi (Shi, Xu et al. 2009). Ces auteurs ont utilisé la spectroscopie RMN afin de voir la décomposition de C-S-H par la carbonatation. Cette décomposition se fait en deux étapes: la première c'est la décalcification graduelle du C-S-H, où le calcium est éliminé de la couche intermédiaire. Dans la deuxième étape, les calciums provenant des couches principales sont consommés, ce qui entraîne la décomposition finale du C-S-H et la formation d'une phase de silice amorphe. Une couche de calcite couvrant une grande partie du C-S-H est également observée. D'autres chercheurs (de Andrade Silva, Mobasher et al. 2009) ont montré que la carbonatation de C-S-H conduit en général à la formation de calcite, Aragonite et vaterite. La formation d'aragonite et Vaterite sont apparentés à la présence de produits totalement décalcifiés (C-S-H). En effet, la figure.11 montre que les mortiers avec les fibres présentent une décalcification de CSH plus grande que le témoin. De plus la formation de CaCO₃ est plus remarquable dans les MF que dans le MT. On conclut que les MF se carbonatent plus que les MT (Saillio 2012).

Les effets endothermiques peuvent être identifiés sous forme de pertes de poids dans les deux principales zones de la décomposition 50-150 ° C et 500-800°C (Pizzol, Mendes et al. 2014).

Tableau 5-1. Regroupe les pertes de masse des échantillons carbonatés et non carbonatés aux températures 130 et 800°C.

Tableau 5-1 Les pertes de masse des échantillons carbonatés et non carbonatés aux températures 130 et 800°C.

	MT		MPP		MAF		MDS		MPD		MCV	
	80-130	700-800	80-130	700-800	80-130	700-800	80-130	700-800	80-130	700-800	80-130	700-800
Non carbonaté	6.3	62.2	8.4	51.4	6.3	51.4	7.1	44.1	8.16	45.9	4.4	34.4
Carbonaté 28j	4.6	62.3	4.5	69.1	4.6	55.3	3.8	70.2	3.9	54.6	3.8	31.2
Carbonaté 52j	4.1	62.4	4.9	58.3	4.9	63.6	4.1	53.2	4.1	53.2	4.4	54.71

La perte de poids entre 80 et 130°C est due à la réaction de C-S-H, ettringite (C₃AS₃H₃₂-AFt), Monosulfoaluminate (C₃ASH₁₂-AFm), monocarboaluminate (C₄AcH₁₁-Mc) avec du CO₂ comme l'ont également observé Almeida et al (Almeida, Tonoli et al. 2013).

Les résultats du tableau 4 indiquent que la masse de CSH des mortiers carbonatés durant 28 jours est diminué d'environ 29% par rapport à celle des mortiers non carbonatés. Le CSH est progressivement décalcifié, converti en CaCO₃ et le silicate hydraté. Aux 52 jours on ne constate pas un grand changement de masse. Ceci est expliqué par la porosité élevée de nos mortiers avec et sans fibres qui permet une diffusion constante de CO₂. La perte de poids

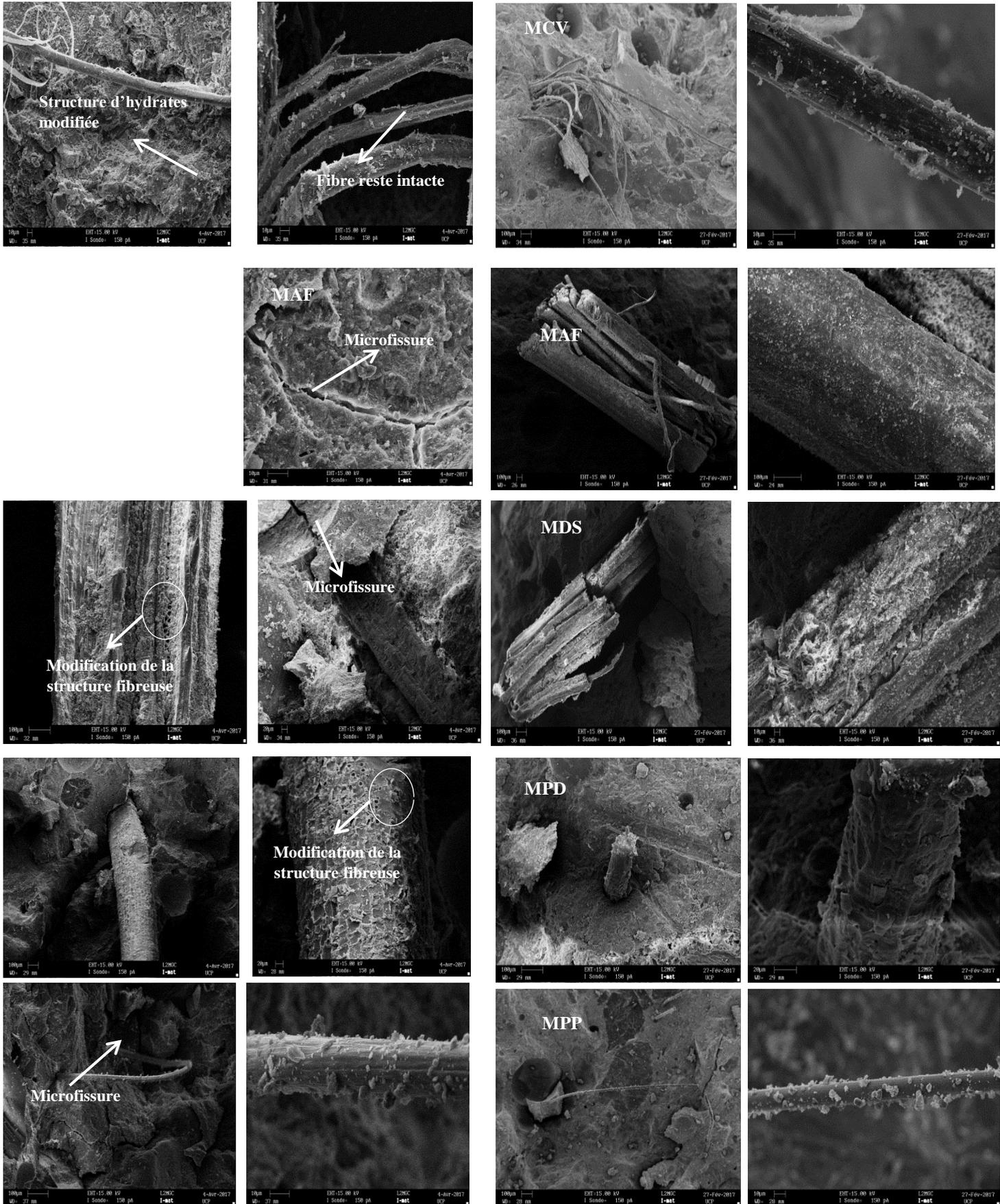
augmente aux températures de 650-750°C due à la décomposition thermique de CaCO_3 mal cristallisé. En outre la cause de la perte de masse aux 750-850 ° C est de la décomposition du CaCO_3 bien cristallisé. Les mêmes remarques ont été également signalées par Rostami et al (Rostami, Shao et al. 2012, Pizzol, Mendes et al. 2014).

5.4.1.5 *Observation au MEB*

Figure 5-15 représente des observations au MEB des sections de mortiers avant et après la carbonatation. L'analyse de ces images nous permet de:

- Observer des phases de ciment à la interface fibre-matrice développées après l'exposition à la carbonatation accélérée;
- Effet de la carbonatation sur la dégradation des fibres végétales utilisées en tant que renforts.

En générale la matrice cimentaire des mortiers carbonatés est plus dense et compacte, ce qui peut améliorer le contact entre fibres et matrice de ciment (Pizzol, Mendes et al. 2014). Par contre dans notre cas et pour les fibres végétales on remarque qu'il y a des microfissures interne d'environ 1 et 2 μm notamment pour MDS. Ces microfissures sont dues à l'augmentation considérable du volume de CaCO_3 provoquant un éclatement à l'intérieur du mélange. De plus l'adhérence entre les fibres et la matrice est réduite à cause de ce gonflement. Ces résultats confirment l'augmentation de la porosité après 52 jours. On remarque aussi des trous sur les fibres végétales notamment pour les palmiers dattiers et Dis. Ce qui signifie que la dégradation de ces fibres est due à la forte concentration de CO_2 . Pour les fibres polypropylène on remarque des petits grains sur sa surface.



52 jours (carbonaté)

Non carbonaté

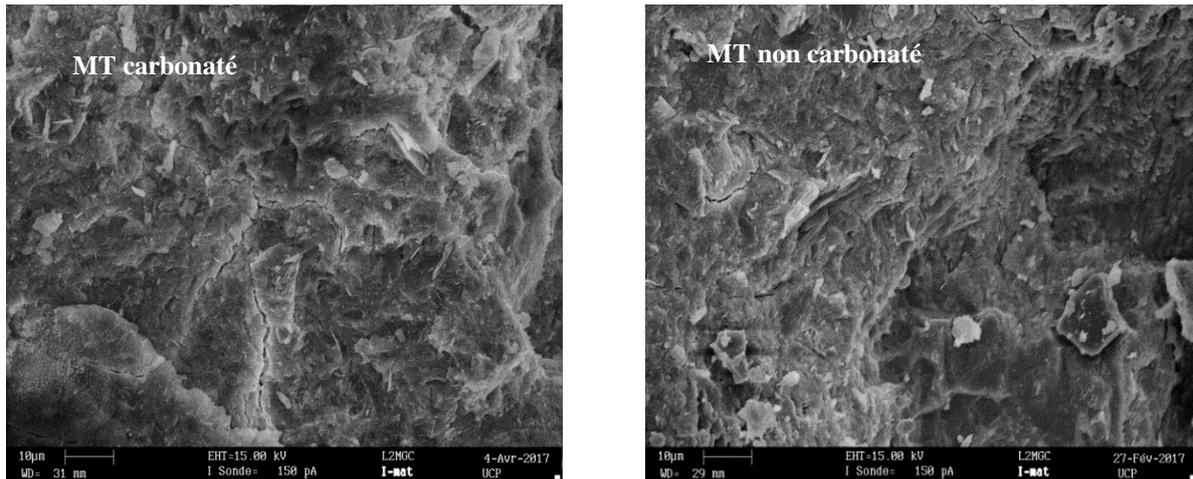


Figure 05-15 Analyse au MEB des échantillons non carbonatés et carbonatés à 52 jours.

5.4.1.6 Conclusion

Dans ce paragraphe, nous avons étudié l'effet des fibres végétales sur le comportement mécanique et les propriétés de transfert des mortiers cimentaires à base de metakaolin. Les résultats obtenus, nous ont permis de montrer que:

- Les fibres végétales présentent une résistance à la traction élevée comprises entre 173 et 619 MPa et une déformation maximale entre 0.433 et 1.178 mm. Ces caractéristiques ont un effet bénéfique sur le comportement en flexion des matériaux cimentaires et leur capacité à la déformation.
- MEB fait à 52 jours sur des mortiers renforcés de fibres végétales montre que ces renforts sont intacts. En effet, le traitement chimique avec de l'hydroxyde de calcium et l'introduction de 30% de metakaolin sont bénéfiques pour la durabilité des fibres végétales dans les matériaux cimentaires.
- Quel que soit la nature des fibres, celles-ci diminuent d'environ 15% la conductivité thermique des mortiers cimentaires.
- La carbonatation accélérée entraîne une densification plus importante du matériau grâce à la formation de CaCO_3 . Néanmoins, ce phénomène entraîne un gonflement conduisant à des microfissures à plus long terme.
- La présence des fibres facilite la pénétration de CO_2 dans le mélange.
- La consommation de CSH, AFm et AFt est également observée à l'aide de DTG durant la carbonatation accélérée.
- Les fibres végétales, en particulier les palmiers-dattiers et le dis se dégradent légèrement à cause de la forte présence de CO_2 .

Enfin cette étude a permis de mettre en évidence le rôle important des fibres végétales sur le comportement mécanique et les propriétés de transfert des mortiers cimentaire. Ces fibres améliorent, notamment les performances mécaniques à long terme. Par ailleurs, le comportement des fibres végétales est similaire au comportement des fibres polypropylènes.

5.4.2 Cycle gel dégel

L'objectif de ce travail est d'étudier la tenue au gel des mortiers pouzzolaniques avec différentes nature de fibres (AF, PD, DS, CV et PP). Nous présentons donc l'essai des cycles gel-dégel avec l'évolution des déformations, la variation de porosité et la conductivité thermique résiduelles des différents mortiers. Le suivi de ces caractéristiques permet en effet d'évaluer l'incidence des sollicitations thermiques de type gel-dégel sur le comportement résiduel des mortiers. L'idée ici est de décrire l'influence des fibres végétales sur la durabilité des matériaux cimentaires.

5.4.2.1 *Observation microscopie*

Dans la figure 5-16 nous présentons des dégradations apparues à partir de 120 cycles gel dégel à la surface de tous les mortiers. A 60 cycles, l'endommagement est plutôt de type d'écaillage ensuite l'état de fissuration s'aggrave au fur et à mesure que le nombre de cycles augmente. Les MPP présentent une petite expansion à la surface. Par contre les autres mortiers ont subis des fissurations linéaires et une légère friabilité en surface. On remarque également que le MT présente les mêmes phénomènes que les mortiers avec fibres.

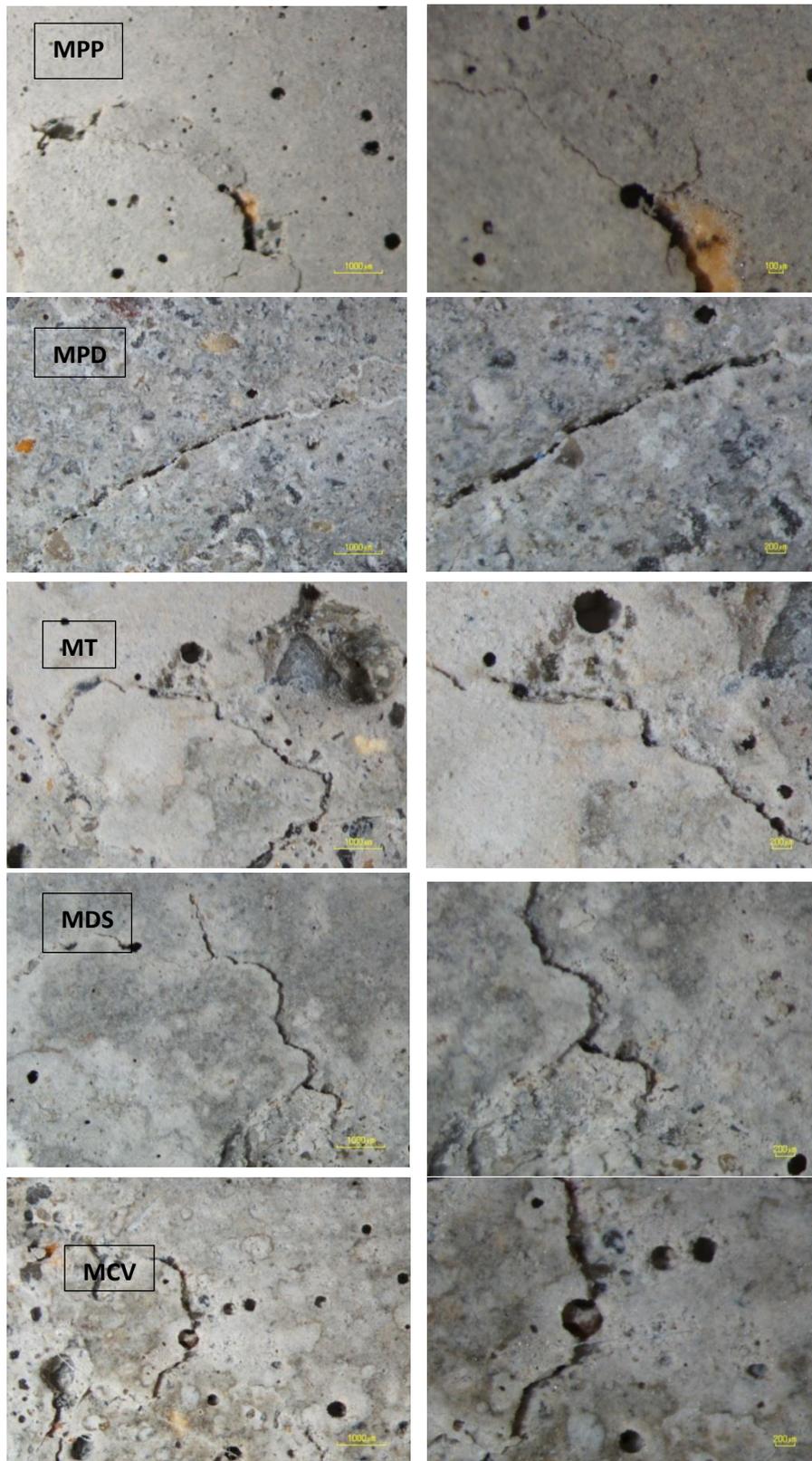


Figure 05-16 Observation par microscopie optique des différents mortiers subis des cycles gèle-dégel.

5.4.2.2 Performances mécaniques

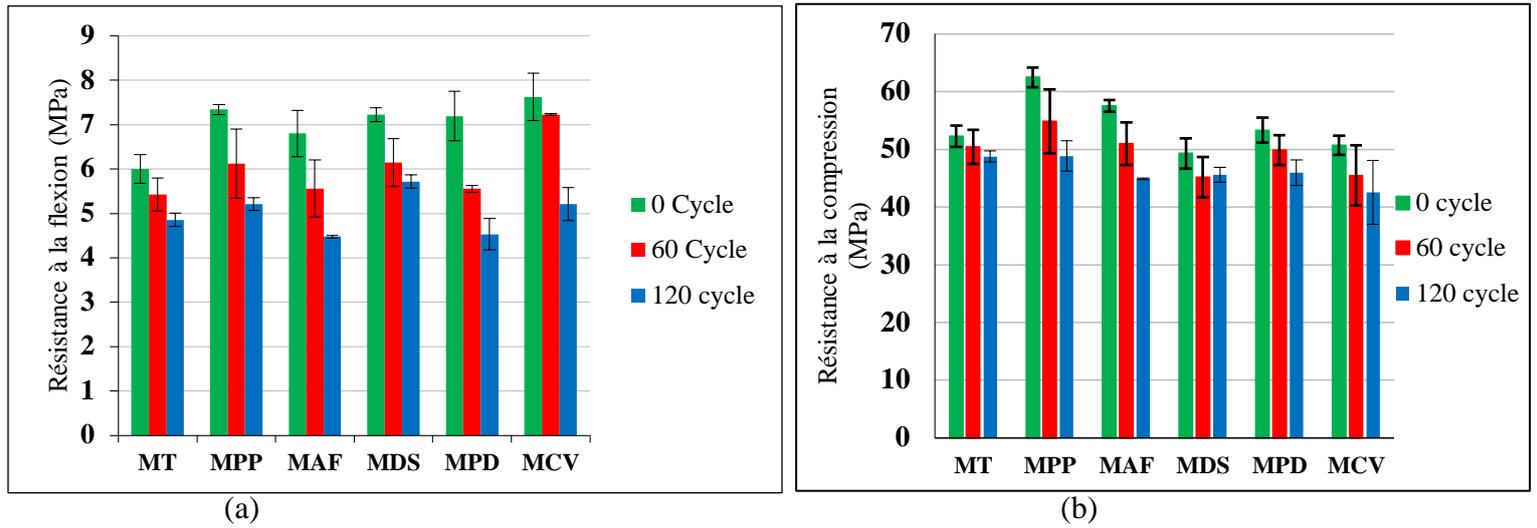


Figure 5-17 (a) résistance à la flexion (b) résistance à la compression des différents mortiers étudiés.

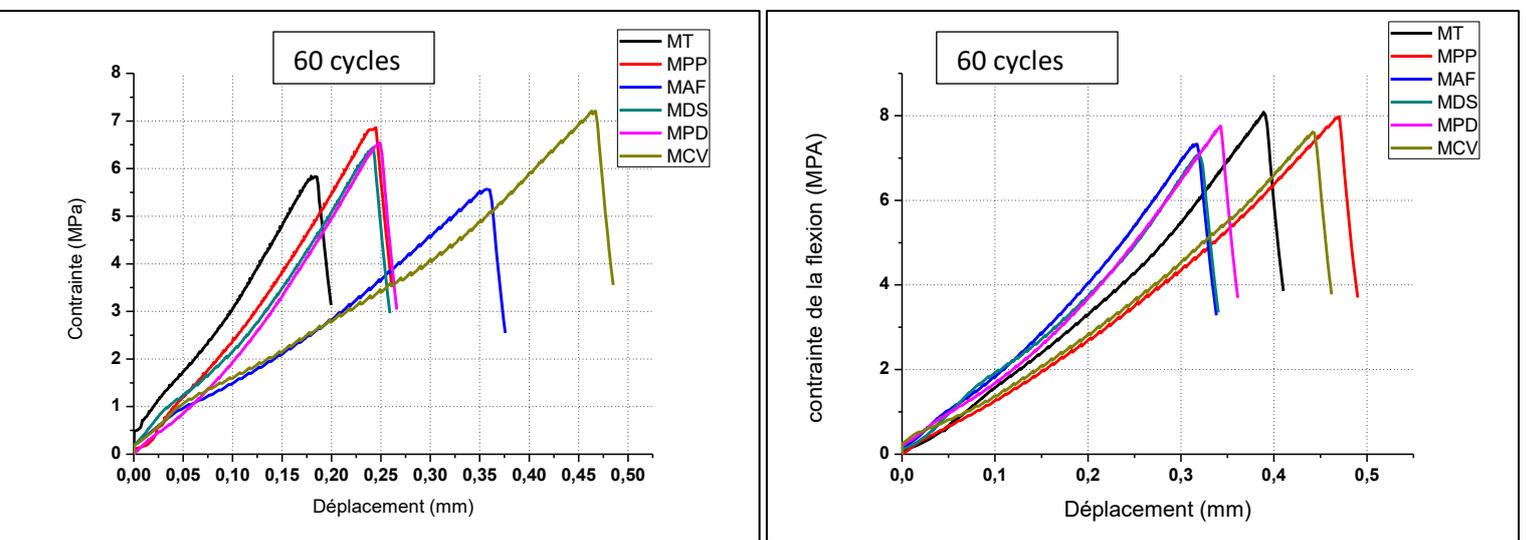


Figure 05-18 Capacité de déformation des différents mortiers avant et après 60 cycles.

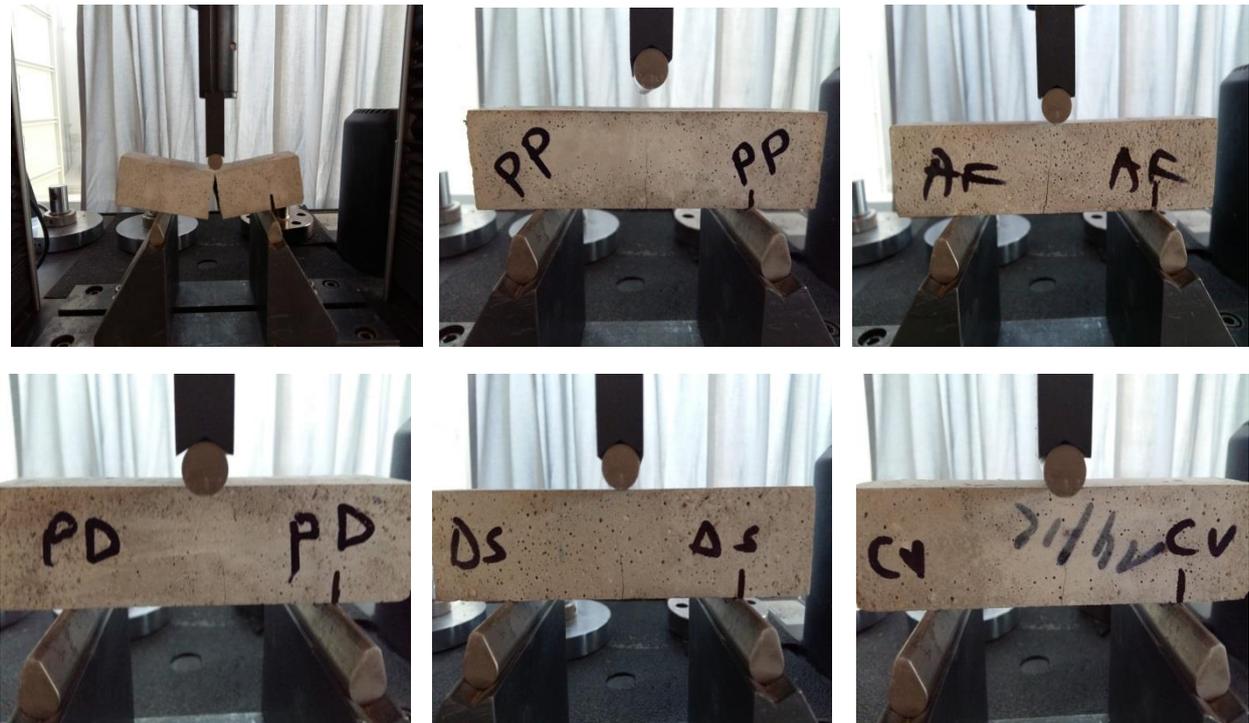


Figure 05-19 Aspect visuel du mécanisme de la rupture des MF.

Dans ces figures les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles. Cette évolution décroissante montre que tous les matériaux testés subissent une fissuration induite par la formation de la glace au niveau des pores du matériau. On peut observer une perte de la résistance à la compression d'environ 10 à 20% à 120 cycles.

Par contre les mortiers avec fibres présentent une diminution plus grande que le MT. La chute la plus importante est celle des MPD en flexion et des MPP en compression. Le MT est plus résistante que les mortiers avec fibres.

On conclut que les fibres végétales sont sensibles au cycle gèle-dégel dépendant en grande partie à la porosité des mortiers fibrés.

Le cycle de refroidissement (-18) : l'eau libre dans le matériau a gèle. Cette gelée provoque une pression hydrostatique interne conduisant à une fissuration interne et une diminution de l'adhérence entre la fibre et la matrice.

D'autres explications complémentaires (Sedan, Pagnoux et al. 2007) montrent que la capacité d'absorption d'eau des fibres végétales est une autre façon de diminuer la durabilité de matériaux cimentaires renforcé de fibres. L'absorption d'eau conduit à des changements de volume qui peuvent induire des fissures dans le composite. Donc on constate que le degré de dégradation de fibres végétales intégrées dans les mortiers augmente avec l'augmentation des cycles de gel-dégel.

5.4.2.3 *Vitesse d'impulsion (VP)*

L'essai de VP est la mesure de la vitesse de l'onde électronique à travers les matériaux. Cet essai peut être utilisé pour détecter les fissures internes, la porosité, la microfissure telle que la dégradation due aux cycles de gel-dégel.

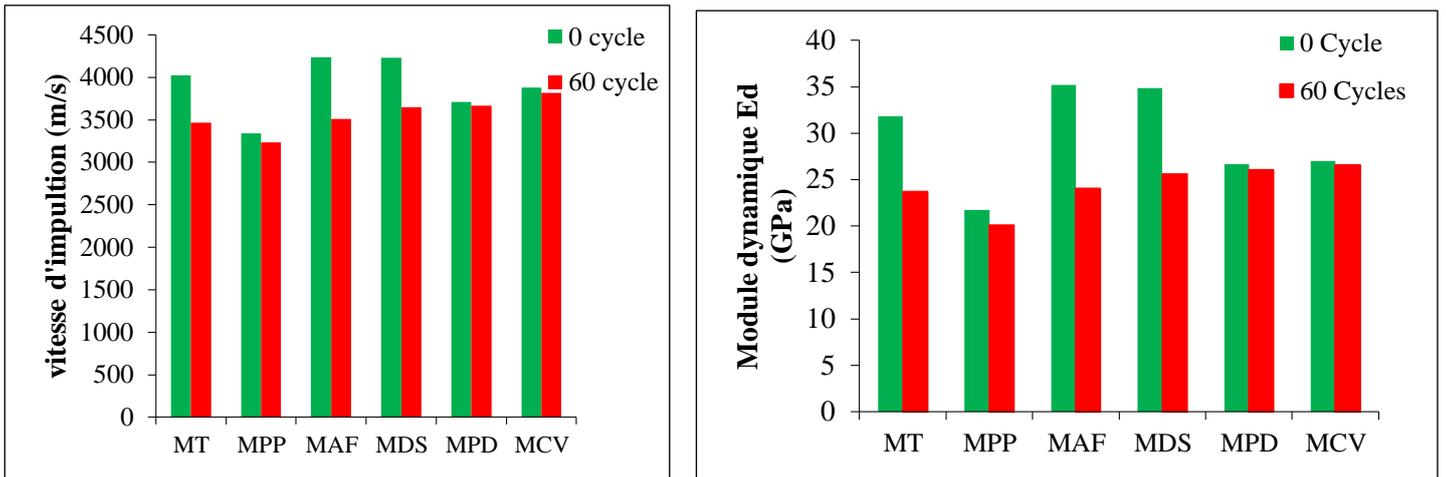
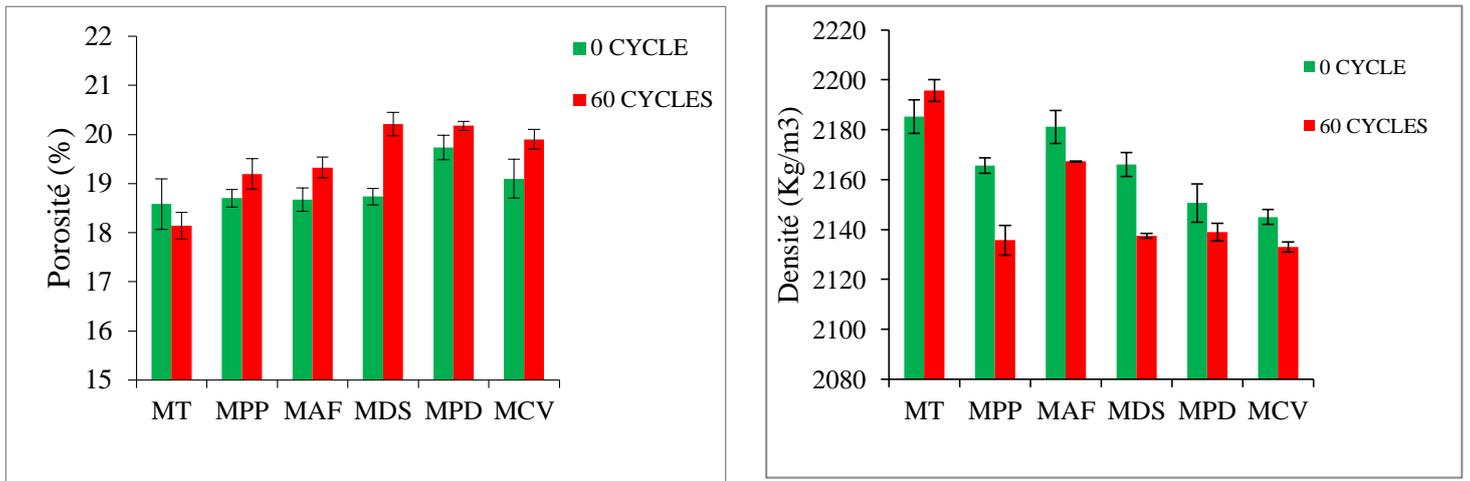


Figure5-20 Evolution de la vitesse d'impulsion des différents mélanges étudiés.

On constate qu'à partir de la figure 5-20 la vitesse d'impulsions diminue après 60 cycles de gèle-dégel. Le MT révèle une diminution importante de PV ainsi que le mortier avec la fibre d'alfa. Les valeurs de PV ont diminué avec un nombre croissant de cycles de gèle-dégel pour tous les mélanges de mortiers. La cause de cette diminution est due principalement à la densité et aux caractéristiques de ITZ (zone de transition interfaciale) du mortier. La réduction maximale de 27%, a été observée pour les échantillons témoins après 60 cycles de gel-dégel. Les mêmes remarques ont été constatées concernant le module dynamique.

5.4.2.4 Porosité accessible à l'eau



(a)

(b)

Figure 05-21 (a) Evolution de la porosité des différents mélanges étudiés. (b) la densité des MF.

L'effet des cycles gel-dégel sur la texture poreuse de l'ensemble des matériaux a été évalué par l'évolution de la porosité à l'eau. Les résultats obtenus sont regroupés dans la figure 5-21. On constate que la porosité de tous les mortiers fibrés a augmenté après les 60 cycles. Cette augmentation varie selon la nature des fibres. On distingue que le MAF présente une croissance de 21%. Par contre la porosité de MT ne subit qu'une légère diminution. Cela

peut s'expliquer par la dégradation des fibres provoquant des cavités au niveau de la structure poreuse du mortier. Les résultats de la densité confirment les constatations trouvées sur la porosité.

5.4.2.5 Conductivité thermique

La conductivité thermique caractérise l'aptitude du matériau à conduire de la chaleur. Ce paramètre est essentiel pour décrire la répartition de la température lors des cycles de gel-dégel. Au cours de l'essai nous avons observé que ce paramètre diminue progressivement du fait de l'altération de la microstructure.

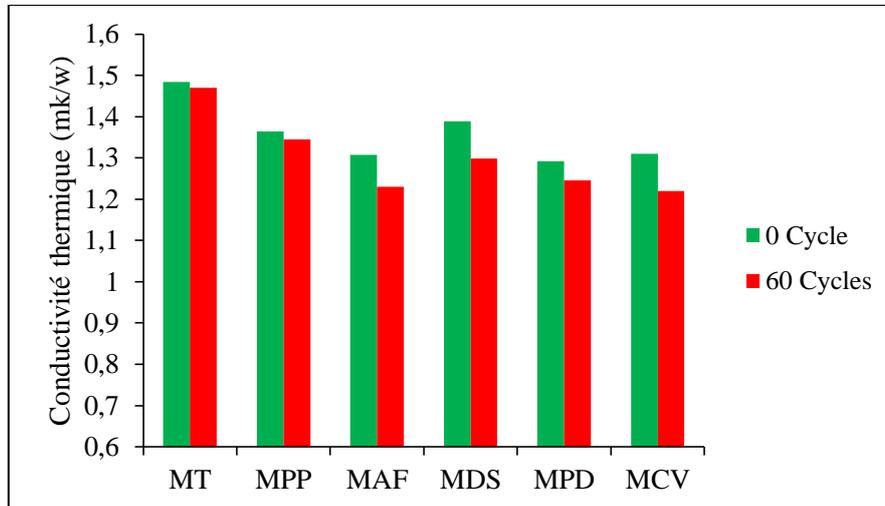


Figure 5-22 Evolution de la conductivité thermique des mortiers après et avant les cycles gel-dégel.

Dans la figure 5-22 la diminution de la conductivité pour les mortiers avec fibres est plus élevée que le témoin. Probablement que la variation de la température à l'intérieur du matériau provoque une mauvaise adhérence entre la fibre et la matrice conduisant à une grande porosité pour les mortiers fibrés que pour les MT. Bien que l'évolution des caractéristiques thermiques soit indispensable pour des éventuels calculs numériques, elles ne peuvent être qualifiées comme indicateur pertinent de l'état d'endommagement des matériaux.

5.4.3 Comportement au feu

5.4.3.1 Observation de la microscopie optique après traitement thermique

Lors de l'exposition à la chaleur, l'observation des éprouvettes n'a pas été possible parce que les parois du four sont opaques. Cependant, après le traitement thermique, les échantillons ont été soumis à un examen visuel par microscopie optique (Figure 5-23).

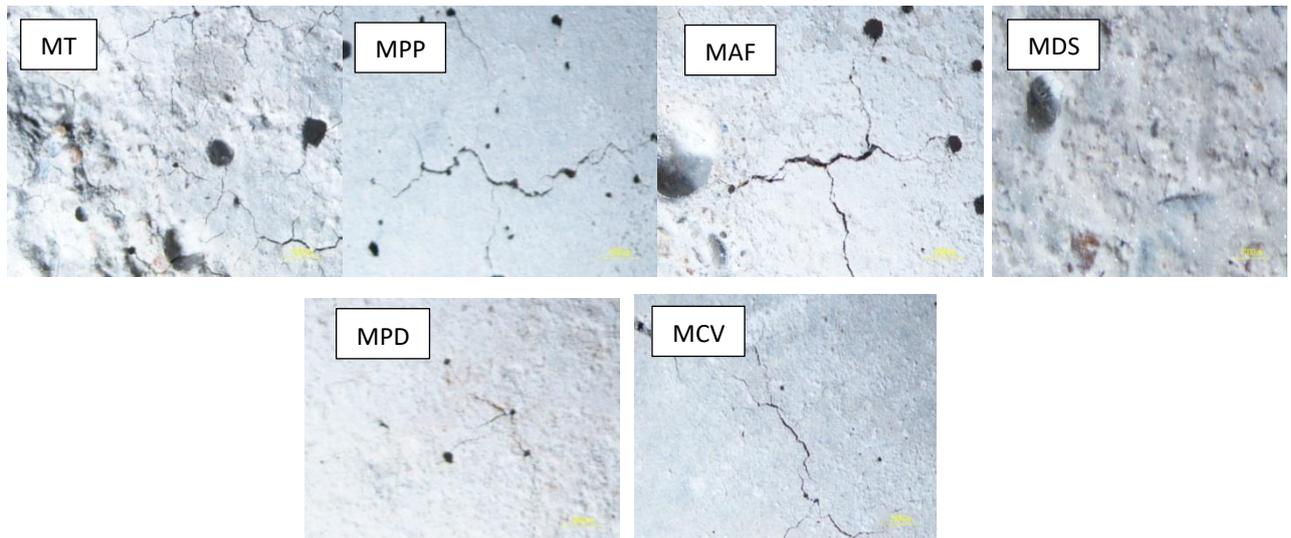


Figure 05-23 Observation par microscopie optique des différents mélanges soumis à 600°C.

La figure 5-23 montre des fissures superficielles plus grandes pour le mortier témoin (MT), que pour les autres mortiers fibrés. Nous pouvons donc constater un effet positif des fibres végétales et polypropylènes sur l'apparition de l'écaillage et de la fissuration des mortiers. Le tableau 6 montre les tailles des ouvertures des fissures observées pour chaque mortier. Les fibres ont pu limiter la dégradation des mortiers cimentaires jusqu'à 85%. La meilleure fibre qui donne le moins d'écaillage est la fibre de Dis.

Tableau.5.2 montre les dimensions des ouvertures des fissures superficielles des mortiers soumis à une température de 600°C observées par le microscope optique.

Tableau 5-2 Ouvertures des fissures superficielles des différents mortiers soumis à 600°C.

Mortier	MT	MPP	MAF	MDS	MPD	MCV
Ouverture des fissures (μm)	133,8	81,13	124,31	21,86	32,04	80,66

5.4.3.2 Performances mécaniques

❖ Résistance à la compression résiduelle

La résistance en compression résiduelle est la caractéristique principale qui permet d'évaluer les performances mécaniques et le comportement des mortiers soumis à une élévation de température. La figure 5-24 montre la variation de la résistance en compression des différentes formulations étudiées en fonction de la température. Les valeurs mesurées après chauffage ont été comparées aux valeurs initiales (avant traitement thermique).

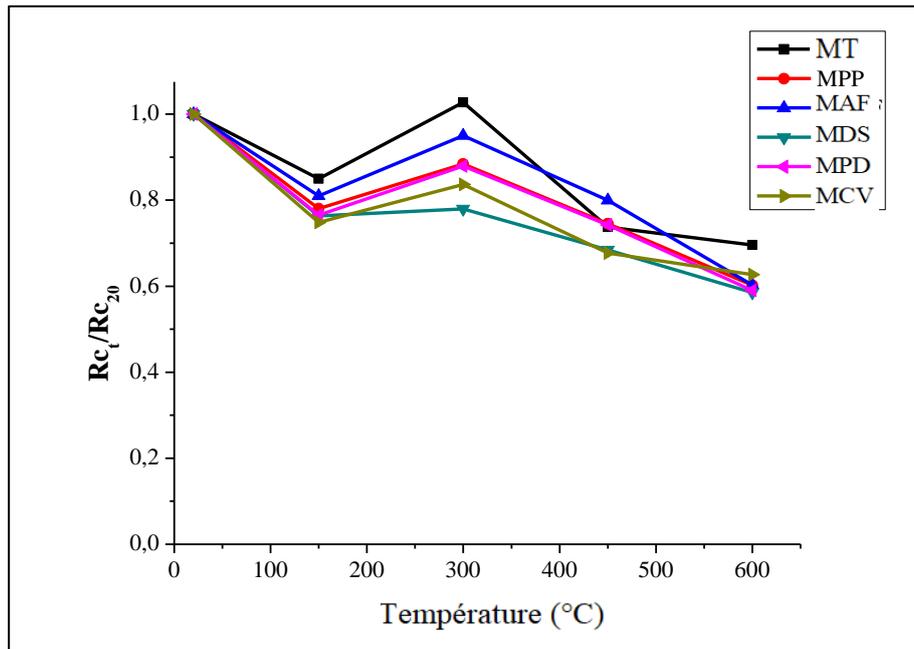


Figure 50-24 Evolution de la résistance en compression des mortiers en fonction de la température.

Le comportement des mortiers fibrés diffère sensiblement de celui des mortiers non fibrés entre 20 et 600°C. Ainsi entre 20 et 150°C la diminution de la résistance de tous les mortiers varie entre 15 et 28%. Néanmoins H. Fares et al (Fares, Noumowe et al. 2009) ont remarqué que la diminution de la résistance entre 20 et 150 ° C, ne conduit pas à une dégradation de la microstructure. Cette diminution est due à la perte d'eau d'hydratation liée aux particules de C-S-H. En effet, l'évaporation de l'eau libre contenue dans le mortier et la formation de pores supplémentaires conduisent à une réduction rapide de la résistance résiduelle (Kalifa, Menneteau et al. 2000). La plus basse résistance correspondant aux mortiers fibrés est imputée d'une part à la fusion des fibres de polypropylène et d'autre part à la dégradation des fibres végétales (Xiao and Falkner 2006, Lee, Han et al. 2012, Sideris and Manita 2013). Ainsi, les canaux laissés par les fibres de PP sont reliés entre eux et forment un réseau de pores plus conjonctif en diminuant la pression de la vapeur interne (Sideris and Manita 2013). Les mortiers avec les fibres végétales présentent une diminution de la résistance d'environ de 28%, notamment pour les MPD, MCV et MDS. Les MT présentent une faible diminution de la résistance de l'ordre de 15%. On constate aussi que les MAF présente un comportement proche à celui des MT. Cela peut être expliqué par la faible quantité de fibres introduite.

A 300°C, on observe une augmentation importante de la résistance en compression résiduelle par rapport à celle mesurée à 150°C. Cette augmentation est de 17,5% pour le mortier témoin et de 2 à 12% pour les mortiers fibrés. Hanas fares et al (Fares, Noumowe et al. 2009) ont montré qu'il y a une hydratation complémentaire du ciment anhydre, en raison des mouvements d'eau importants qui se produisent pendant le chauffage entre 100 et 300 ° C. Ainsi à 300 ° C, tous les grains anhydres du ciment ont été réhydratés.

Les mortiers avec fibres révèlent une augmentation de résistance moins importante que celle du mortier sans fibres. Ceci est expliqué par l'analyse thermogravimétrique des fibres

végétales qui montre une dégradation des fibres variant de 23 à 28% (figure 3-33). Cette dégradation des fibres végétales crée des vides supplémentaires à l'interface fibre-matrice. Ainsi les MT, en raison de leur microstructure dense présentent une résistance plus importante.

Entre 300 et 450 °C une diminution de la résistance est observée pour tous les mélanges MT, MPP, MAF, MDS, MPD et MCV, respectivement de 26%, 34%, 24%, 46%, 33% et 47,5% par rapport à celles mesurées à température ambiante. Certains chercheurs expliquent cette perte de résistance en grande partie par la décomposition de brucite $Mg(OH)_2$ et $Fe(OH)_2$ (Behnood and Ghandehari 2009). Dans cette phase les fibres végétales sont dégradées jusqu'à 65 %. Cette carbonisation des fibres crée des pores supplémentaires. Ces derniers varient suivant la nature et la taille des fibres, on trouve par l'analyse microstructurale par microscope électronique à balayage des vides à 450°C de : 12 μ m, 36 μ m, 90 μ m, 105 μ m pour les MCV, MDS, MAF et MPD respectivement. Mais le nombre de ces vides dépend aussi du nombre de fibres existant dans le mélange. On remarque à titre d'exemple que la fibre de chanvre crée de petits pores de 12 μ m, mais le nombre de ces renforts est plus élevé que pour les autres fibres ce qui conduit à une plus grande baisse de la résistance. Par contre on remarque que la chute de la résistance à 450°C par rapport à 300°C pour les MT est plus élevée que pour les MF. Ce phénomène est dû encore à la microstructure dense des MT qui provoque une dégradation à l'intérieure du mélange. Donc on suppose que la carbonisation des fibres végétales joue un rôle important afin d'éviter l'écaillage et la détérioration interne des mortiers. Ces résultats sont confirmés par M. Ozawa and H. Morimoto(Ozawa and Morimoto 2014).

Par contre à 600 °C tous les échantillons présentent une diminution de la résistance de 65% et 46% pour les mortiers avec fibres et sans fibres respectivement. Les propriétés mécaniques des mélanges deviennent plus faibles. La microstructure est détériorée rapidement, par une transformation chimique de la brucite cristal et la décomposition des produits d'hydratation comme l'évaporation de l'eau liée au CSH. Ces transformations chimiques produisent plus de fissures conduisant à une augmentation de la porosité d'environ 26%. La variation des valeurs, durant le cycle de chauffage entre les mortiers avec fibres (MF) est due à la nature des fibres et à leur distribution. En effet l'analyse thermogravimétrique montre que les fibres de Dis, d'alfa et de chanvre se dégradent plus rapidement que les fibres de palmier dattier. De plus, le diamètre des fibres de Dis et d'Alfa est deux fois plus grand que celui des fibres de palmier dattier et presque 7 fois plus grand que celui les fibres de chanvre.

On conclue à partir de ces constatations que les fibres végétales présentent un comportement similaire à celui des fibres de polypropylène, avec un avantage écologique et économique.

❖ Résistance à la flexion résiduelle

La résistance à la traction ou flexion joue un rôle important dans la réduction ou l'apparition de l'écaillage aux températures élevées (Fares, Noumowe et al. 2009). La figure 5-25 représente le rapport de la résistance résiduelle à la flexion de l'ensemble des mortiers sans fibres et avec fibres par rapport à leur résistance à la température ambiante (20 ° C).

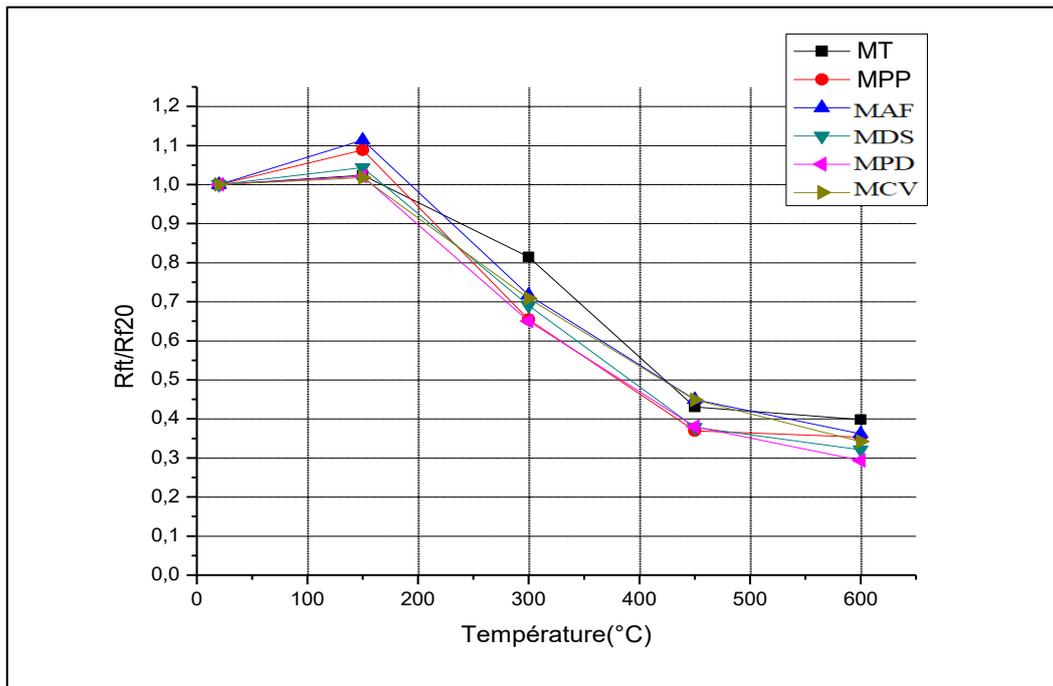


Figure 5-25 Résistance à la flexion résiduelle.

La résistance à la flexion des mortiers augmente légèrement comme le montre la figure 5-25, pour tous les mélanges entre 1 et 9%. Les mortiers qui contiennent des fibres végétales, présentent une augmentation plus remarquable. Entre les températures 150 à 300°C, on constate qu'il y a une chute de la résistance à cause des fissurations engendrées par l'exposition des mortiers au feu. La résistance à la flexion (R_f) diminue contrairement à la résistance à la compression (R_c) sous haute température (on explique ça par la complexité du comportement des matériaux cimentaires au feu). Cette diminution de la résistance est due au développement de la pression interstitielle dans les microstructures des mortiers ce qui entraîne une perte rapide de la résistance à la flexion (Fares, Noumowe et al. 2009). Cette diminution de la résistance entre 20 et 300°C est de 23, 53, 39, 45, 53 et 41% pour les mortiers MT, MPP, MAF, MDS, MPD et MCV respectivement. Ainsi, la diminution de la R_f est plus importante que celle de la compression, ces résultats sont confirmés par la littérature qui montrent que le comportement en flexion est plus sensible que la compression à élévation de la température (Behnood and Ghandehari 2009, Fares, Noumowe et al. 2009). On conclue que l'évolution de la résistance en flexion est influencée par la présence des fibres sans dépendre de leur nature. Les MT entre 300°C et 450°C subissent une diminution plus importante que les MF. A cause de la compacité plus élevée. H. Fares et al (Fares, Noumowe et al. 2009) ont attribué ce phénomène aux macros et microfissures produites dans les échantillons provoquant une diminution de la résistance en flexion des bétons chauffés. Les mortiers avec des fibres végétales présentent un comportement presque similaire. Par contre les MPP présentent les plus faibles résistances à la flexion pour toutes les températures. Entre de 450 à 600 °C on observe une diminution faible de la résistance à la flexion de 60 et 71% par rapport 20°C. La perte de la résistance dans les MF est légèrement plus grande que les MT. Donc on confirme que la carbonisation des fibres végétales crée des vides supplémentaires diminuant la pression interne due à l'évaporation d'eau interstitielle. Ainsi la

dégradation de ces fibres engendre une faible adhérence entre elles et la matrice. Ce qui conduit à une faible performance mécanique.

❖ Vitesse d'impulsion résiduelle

La vitesse d'impulsion résiduelle de tous les mortiers après chaque cycle est définie sur la figure.5-26. Dans ce document, la vitesse de l'impulsion ultrasonique (PV) est utilisée pour évaluer et confirmer quantitativement la résistance à la compression résiduelle des mortiers soumis à des températures élevées.

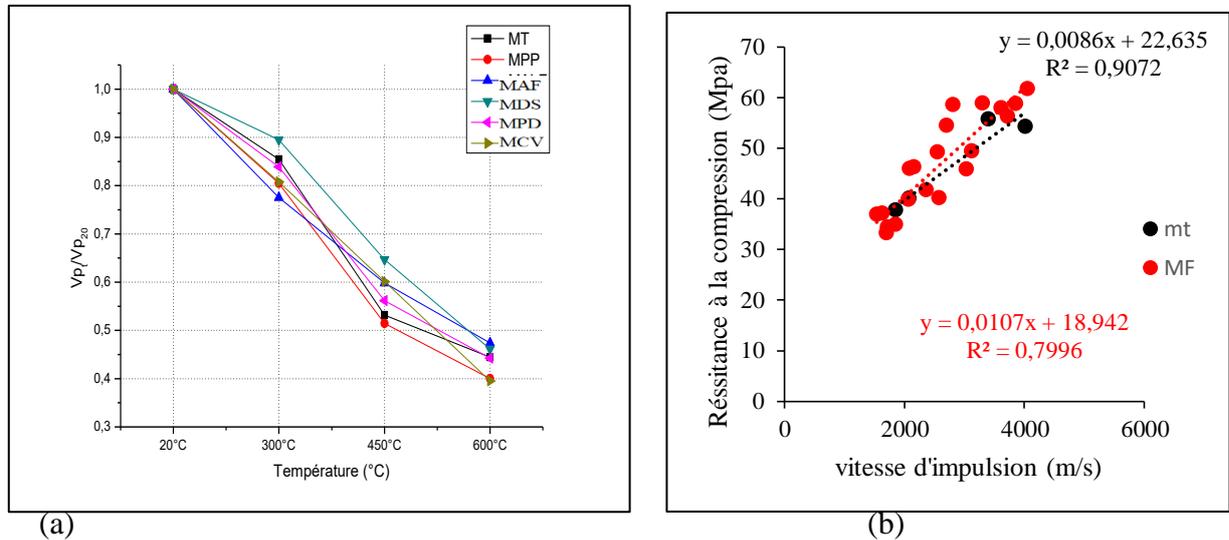


Figure 5-26 (a) le rapport de la vitesse d'impulsion avant et après les cycles de chauffage des MT et MF. (b) relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression.

La figure 5-26 (a) montre une diminution presque linéaire de la vitesse suivant la température qui indique l'apparition de fissures dans les éprouvettes de mortier et une augmentation de la porosité. A 300°C les MPP ont révélé une vitesse d'impulsions résiduelles plus faible que les autres mortiers. Le MT présente une faible réduction par rapport aux MF. La fusion des fibres de PP et la carbonisation des fibres végétales provoquent des pores supplémentaires et des cavités. Cette fusion et cette carbonisation engendrent une grande diminution de la vitesse d'impulsion résiduelle pour les MT précisément à 300°C. On constate aussi un effet de décélération cela signifie que les canaux provoqués par ces fibres fondues et carbonisées elles-mêmes sont des défauts de matériau (dommages) dus à la température élevée, ce qui conduit à la chute de la PV (Sideris et Manita 2013).

Par contre au 450°C les MT subissent une chute de la résistance remarquable comme on l'a vu dans les performances mécaniques précédentes. On confirme donc que la température la plus critique est à 450°C. Ainsi la cause de cette diminution pour les MT est de la dégradation micro-structurale résultant à la grande compacité de ce mélange (absence de pores supplémentaires). Cette microstructure dense provoque une décomposition des hydrates dans la pâte de ciment en raison de la pression de l'évaporation d'eau élevée. Ici la comparaison entre les fibres est difficile tout dépend de leur distribution dans le mélange et la nature. Ces résultats de VP correspondent bien aux résultats des résistances mécaniques, la densité et la diffusivité de la chaleur.

Nous comparons la vitesse d'impulsion résiduelle à 600° C avec celle à 20°C, nous trouvons alors que la diminution varie entre 65% et 55%. Les MDS montrent de faible réduction de V_p expliquée par les petites largeurs de la fissuration interne observée par MEB et microscope optique les valeurs sont respectivement de 36 et 21 μ m. Donc la VP avec l'augmentation de la température est liée à la microstructure endommagée et la porosité élevée. La figure V.26.b montre la relation linéaire entre VP et RC. On constate que les mélanges de MT et MF présentent une bonne corrélation avec un coefficient de $R^2=0,91$ et 0,80 respectivement. Cette différence de coefficients dépend de la nature différente de ces fibres et leur orientation dans le mélange.

❖ Endommagement

Lorsque les mortiers étaient exposés à des températures élevées, l'évolution des dégâts pourrait être décrite par un modèle de distribution Weibull (Chu, Jiang et al. 2016). Celui-ci est exprimé par l'équation (2):

$$D_V^T = 1 - \left(\frac{\rho^T}{\rho^{20}}\right) \times \left(\frac{V^T}{V^{20}}\right)^2 \dots (2)$$

D_V^T, ρ^T, V^T représentent le coefficient d'endommagement, la densité absolue et la vitesse d'impulsion à une température donnée. ρ^{20} et V^{20} la densité absolue et la vitesse d'impulsion à 20°C.

La figure 5-27, montre l'évolution de l'endommagement des mortiers en fonction de la température.

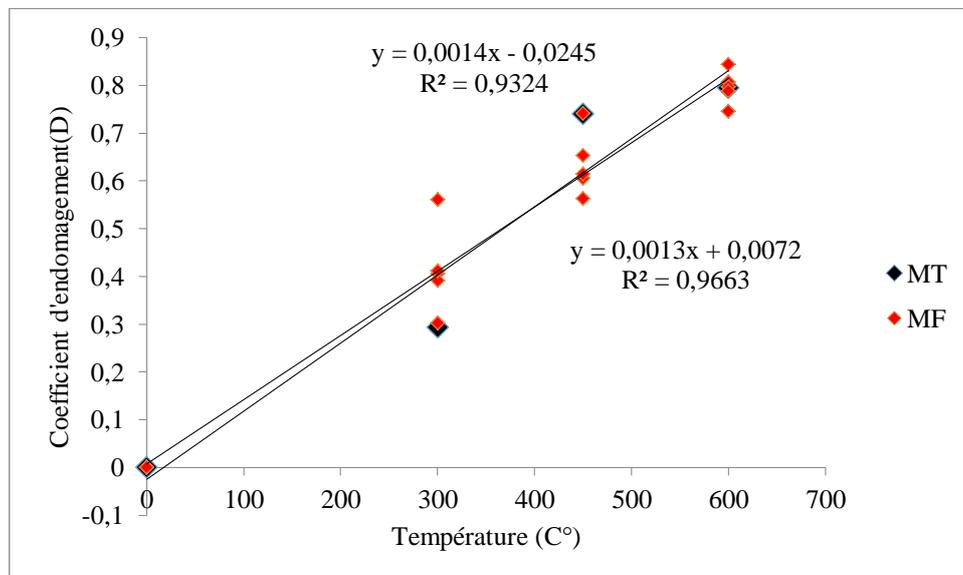


Figure 5-27 Evolution de l'endommagement en fonction la température.

Où D est l'endommagement des Mortiers et T la température en °C à laquelle les mortiers sont soumis. L'équation (2) peut être utilisée pour caractériser l'évolution des dégâts des mortiers soumis à des températures élevées (Chu, Jiang et al. 2016). On constate que l'endommagement des mortiers augmente avec la température. La cinétique de cette

augmentation varie selon la présence ou non des fibres. A 300 °C on remarque que l'endommagement des MF est plus grand que celle du MT. Ce qui est compatible avec le fait que la porosité du MF est supérieure à celle du MT. Il convient de noter que les dégradations des MT augmentent rapidement à des températures de 300-450°C. Ce qui correspond bien aux tendances de la chute de la résistance à la rupture, VP et la densité des MT. Les MF à la température de 450°C montrent de dégradations inférieures à celles des MT. Cependant, le modèle établi dans le document est précis pour décrire l'évolution des dégradations des MF exposés à des températures élevées. Enfin on peut dire que l'incorporation des fibres permet une diminution des endommagements des matériaux cimentaires soumis à haute température notamment (450°C).

❖ Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique E_d est un paramètre clé pour l'analyse structurale du béton dans des conditions dynamiques telles que les charges sismiques. Il n'est pas précis de le déterminer directement à partir des essais standards de compression. On ne peut le déterminer qu'à partir des essais non destructifs (la vitesse d'impulsion ultrasonore (VP)) qui est largement utilisé pour cet effet (Zhou, Gao et al. 2015) (Lu, Sun et al. 2013)

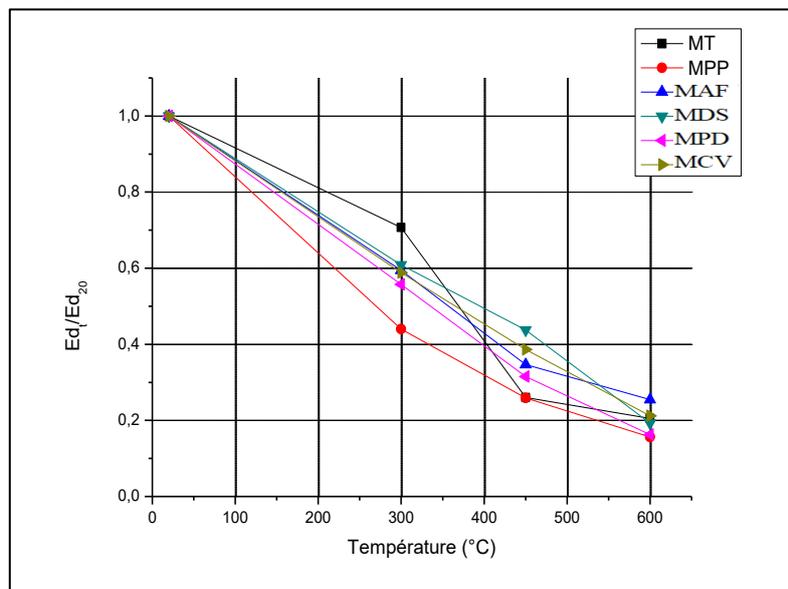


Figure 5-28 Rapport du module dynamique après et avant exposition de la température.

A partir de la figure 5-28 on constate que le module d'élasticité dynamique des mortiers avec ou sans fibres diminue progressivement avec l'élévation de la température. On remarque qu'à 300 °C la diminution du module dynamique des MF est plus importante que celle du MT, notamment pour le MPP. Par contre à 450°C on remarque que les mortiers témoins présentent une chute importante du module de 44% par rapport à 300°C, qui signifie une dégradation interne considérable. Les MPP subissent de grandes dégradations dans tous les mélanges à cause de la fusion de la fibre PP à 150°C. Cette dernière crée des canaux et des pores supplémentaires à l'intérieure du mortier.

On peut dire que le module d'élasticité dynamique décrit bien le rôle des fibres végétales sur le comportement du mortier. Les fibres végétales donnent des résultats encourageants vis-à-vis du comportement des mortiers au feu.

5.4.3.3 Porosité accessible à l'eau

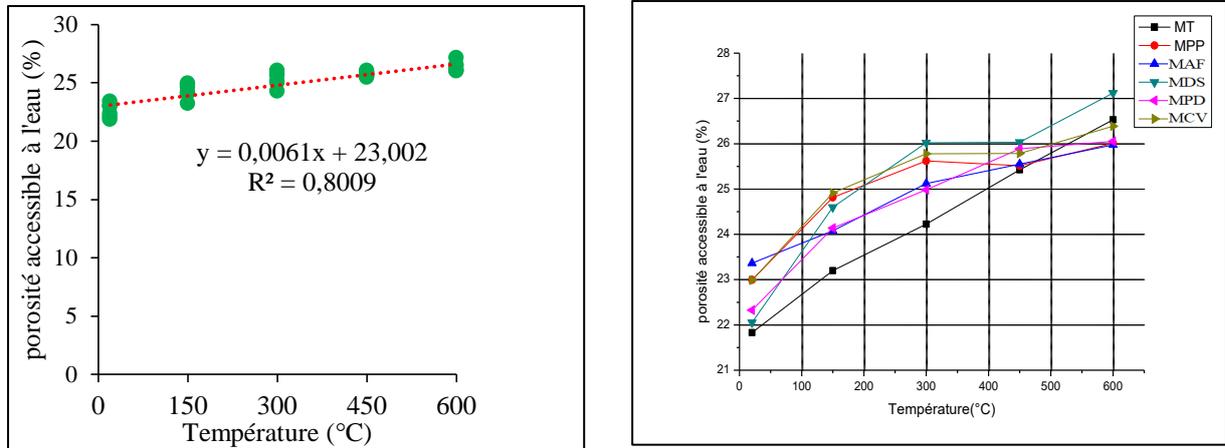


Figure 5-29 (a) Evolution de la porosité suivant la température. (b) Relation entre la porosité et la température.

On remarque à partir de la figure 5-29 que la porosité augmente avec l'évolution de la température. On constate aussi que les MT présentent un comportement linéaire. Par contre les MF révèlent une variation différente. Ainsi :

- A 20°C les porosités des MF sont supérieures à celles des MT avec des valeurs 21 et 23 % pour les MT et MF respectivement. Ces résultats sont confirmés par d'autres recherches. Hong-yan Chu et al (Chu, Jiang et al. 2016) ont montré que de l'augmentation de la porosité en fonction de la température est due principalement à la perte d'eau adsorbée dans les pores capillaires et l'eau des produits d'hydratation.
- Entre 20 et 300 °C on constate qu'il y a une augmentation considérable de la porosité surtout pour les mortiers avec fibres. La cause de cette augmentation est la création des vides due à la dégradation des fibres dans les mélanges.
- Après 300°C et jusqu'à 450°C on constate que la cinétique de la progression de la porosité des MF diminue. A l'inverse, celle du MT continue à progresser. Ceci, peut expliquer la chute importante des performances mécaniques et de la vitesse d'impulsion des MT à 450 °C.
- Entre 450 et 600°C la porosité augmente jusqu'à 26 % environ. (Khaliq et Kodur 2011) ont montré que la perte d'eau liée à ces températures (450 et 600°C) est le principal changement au niveau de la microstructure du matériau. Ces transformations détruisent la structure du gel de CSH et créent une porosité supplémentaire. Le chanvre et le polypropylène ont un comportement similaire. Ceci peut être dû à leur dimension similaire et à leur rigidité.

On constate à partir de la figure 5-29 (b) qu'il y a une bonne corrélation entre la température et la porosité des Mortiers.

5.4.3.4 Densité

La densité est un facteur important dans la détermination de la porosité, l'évaluation de la durabilité et l'estimation des constantes du réseau poreux pour la matrice.

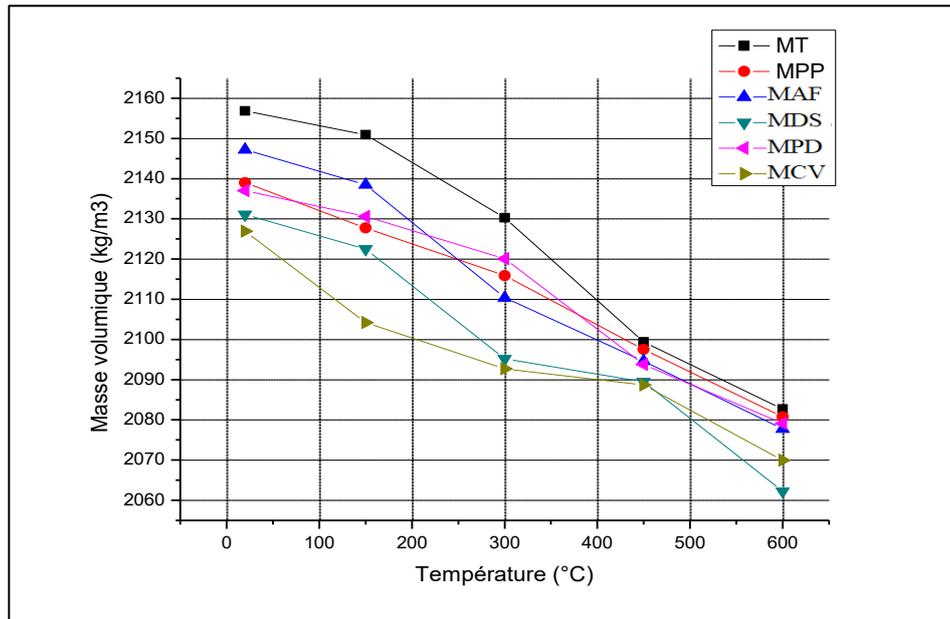


Figure 5-30 Évolution de la densité suivant la température.

Dans ce travail nous utiliserons les résultats de la densité pour calculer le module dynamique (E_d) et le coefficient de l'endommagement (D).

On remarque à partir de la figure 5-30 que la densité des mortiers diminue avec l'évolution de la température (Fares, Noumowe et al. 2009). Cela signifie que quand la porosité augmente les performances mécaniques diminuent. Ainsi, on peut voir que les MCV présentent une faible densité par rapport aux autres fibres. Cela peut-être à cause du diamètre et de la flexibilité de cette fibre.

5.4.3.5 Conductivité thermique

L'objectif principal d'étudier ce phénomène est d'évaluer la possibilité d'utiliser ces nouveaux matériaux comme isolant thermique dans les constructions. Nous montrons également l'évolution de la capacité de diffusion des flux de chaleur des mortiers exposés à des températures élevées.

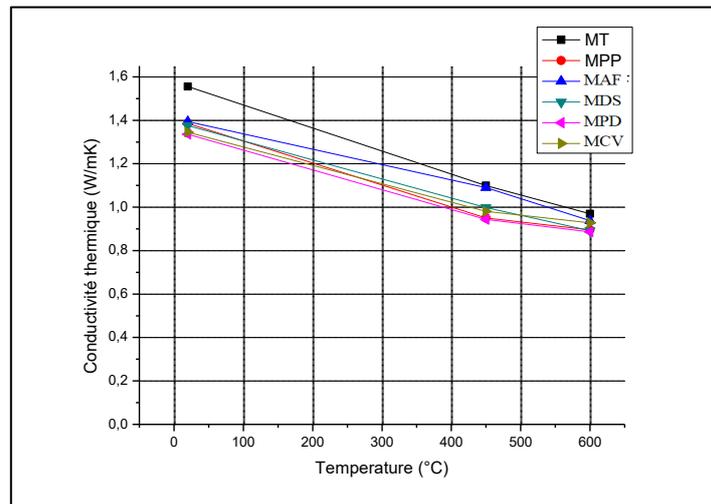


Figure 5-31 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température.

La figure 5-31 montre la variation de la conductivité thermique des différents mortiers en fonction de la température. A 20°C on remarque que l'addition des fibres dans les mortiers réduit la conductivité thermique du composite. Cette réduction est attendue car les fibres ont une conductivité thermique faible par rapport à celle de la matrice (Ding, Azevedo et al. 2012). En outre, l'introduction fibres dans le composite tend à générer une porosité supplémentaire dans la matrice et ainsi réduise la densité. En générale les mortiers cimentaires donnent des conductivités entre 2 et 2,5W/mK. Nos valeurs varient entre 1,3 et 1,5 W/mK. Selon Kim Hung Mo et al (Mo, Bong et al. 2017) les mortiers qui contiennent un pourcentage élevé de metakaolin provoquent des vides à cause de la réaction tardive de pouzzolane. Tous les mélanges avec les fibres donnent des valeurs quasiment similaires. On confirme que la nature des fibres n'influe pas beaucoup sur la conductivité thermique. A 450°C on constate qu'il y a une grande diminution de la conductivité dont les valeurs sont de 1,1 et 0,94 respectivement pour les MT et les MF. Cette diminution de la conductivité thermique peut être attribuée à la variation de la teneur en eau dans les matériaux cimentaires durant le chauffage (Khaliq et Kodur 2011). Une légère variation de la conductivité entre 450 et 600 °C due à la libération d'une faible quantité d'eau conservée dans les couches de silicate de calcium hydraté (C-S-H). A cette température la conductivité thermique de tous les mortiers suit une tendance similaire et se rapproche de la valeur de 0,9 W/mk. A cette température les fibres montrent une légère diminution par rapport au MOT. A cause de leur dégradation qui introduit des petits pores supplémentaires.

5.4.3.6 Relation entre la conductivité et les différentes caractéristiques

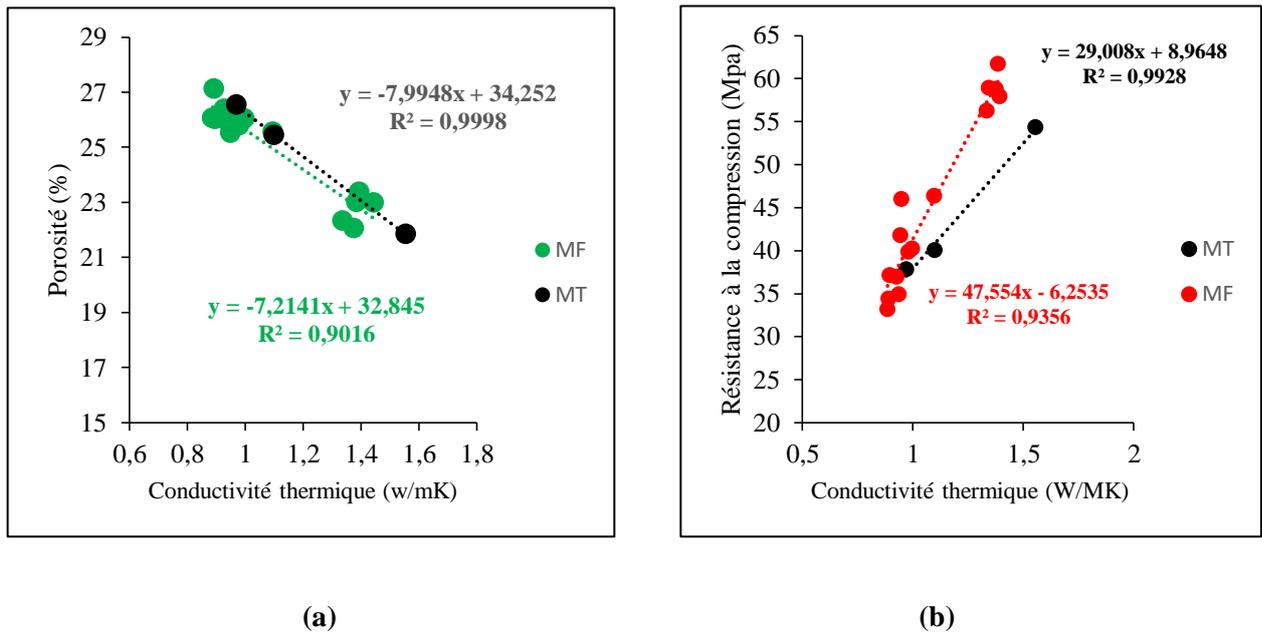


Figure 5-32 (a) Relation entre la conductivité thermique et la porosité. (b) Relation entre Q et la résistance à la compression.

D'après la figure 5.32 (a) on remarque qu'il y a une bonne corrélation entre la conductivité thermique et la porosité. Si la conductivité augmente la porosité diminue. Les coefficients de corrélation sont $R^2=0,99$ et $R^2=0,90$ respectivement pour les MT et MF. De plus, nous constatons également une bonne corrélation entre la résistance en compression (R_c) et la conductivité thermique. Si R_c augmente la conductivité augmente (Q). On conclue que la conductivité thermique est un paramètre clé pour prévenir les R_c et la porosité (P). On résume dans le tableau 5.3 toutes les relations a trouvées dans ce travail :

Tableau 5-3 Différentes relation entre les différents paramètres étudiés.

	V_p et R_c	P et T	D et T	P et Q	R_c et Q
MT	R_c $= 0,008(V_p)$ $+ 22,635$	P $= 0,0061(T)$ $+ 23,002$	D $= 0,0014(T)$ $- 0,0245$	P $= -7,9948(Q)$ $+ 34,252$	$P = 29,008(Q) + 8,9648$
R^2	0,91	0,80	0,93	0,90	0,99
MF	R_c $= 0,0107(V_p)$ $+ 18,942$	P $= 0,0061(T)$ $+ 23,002$	D $= 0,0013(T)$ $+ 0,0072$	P $= -7,2141(Q)$ $+ 32,845$	$P = 47,554(Q) - 6,2535$
R^2	0,80	0,80	0,97	0,90	0,93

On constate que toutes les relations ont donné un bon coefficient de corrélation variant entre 0,80 et 0,99. Ce qui confirme la fiabilité de nos résultats concernant les différents phénomènes étudiés.

5.4.3.7 Analyse thermogravimétrique

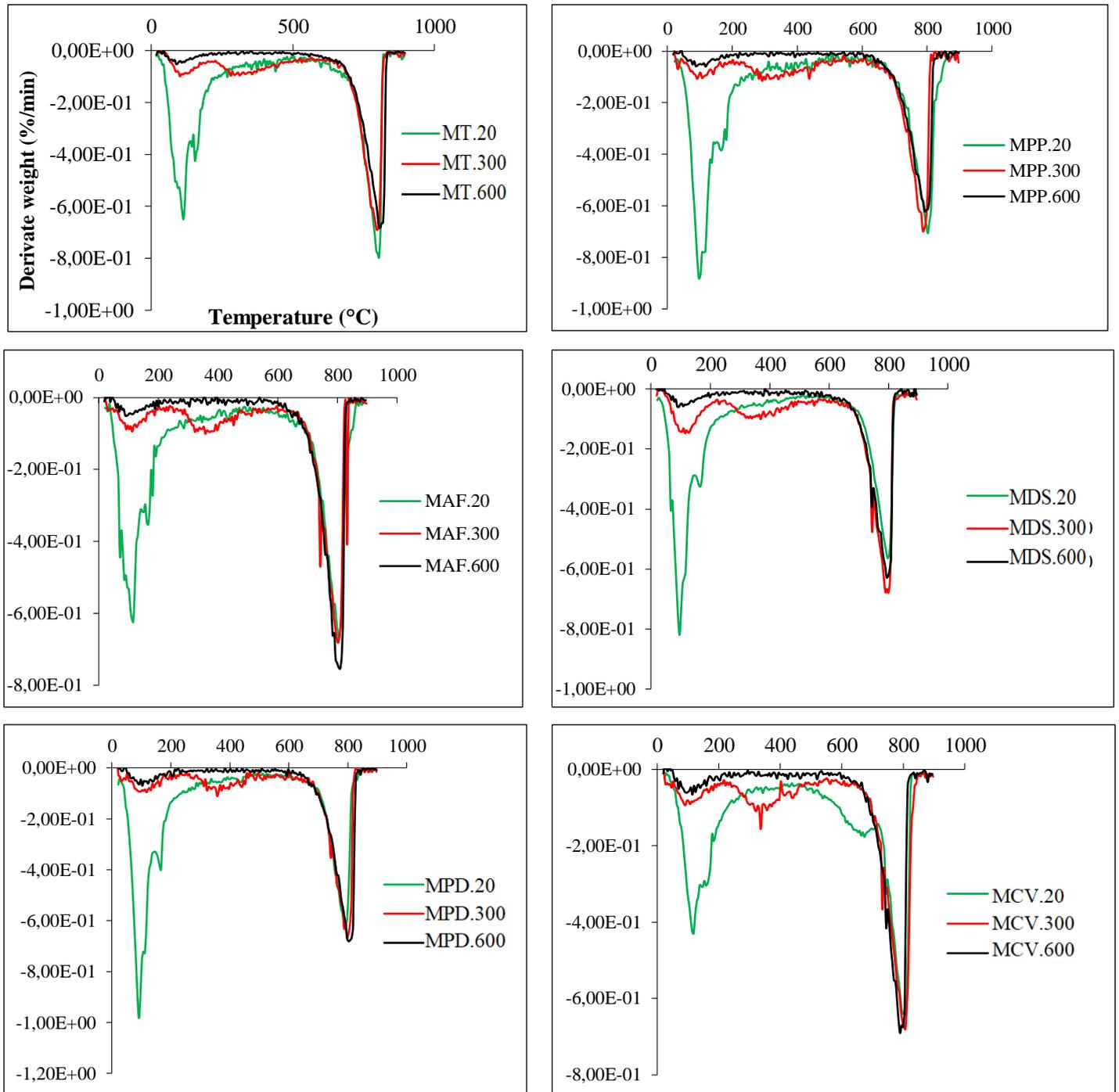


Figure 5-33 Analyse thermogravimétrique de différents mélanges de 20 à 600°C.

La figure 5-33 représente les résultats de l'analyse thermogravimétrique des échantillons MT et MF (Avant le traitement thermique). On observe quatre pics endothermiques différents:

- *Avant traitement thermique:*

Avant le traitement thermique, les éprouvettes de mortiers étaient conservées à 20°C. Les courbes des mortiers à 20°C présentent quatre pics endothermiques différents: 95 à 130 ° C, 200 ° C, 400 ° C, et 780 à 830 ° C. Ces différents pics sont liés aux températures de transition de phase des différents hydrates dans le mortier.

- Le double pic à 95-130 ° C peut être attribué au départ de l'eau libre dans certains hydrates comme le CSH et l'étringite (Nawy 1996). Dans cette phase, on remarque que les pics des mortiers avec fibres sont plus importants que ceux des MT. La perte de masse dans cette phase est de 6.42%, 7.92%, 6.3%, 7.3%, 8.16%, 6.59% pour les MT, MPP, MAF, MDS, MPD et MCV respectivement. On explique ces différentes pertes par l'évaporation de la quantité d'eau supplémentaire absorbée par les fibres.
- A 140 °C, la présence d'un pic indique la déshydratation et la décomposition du gel de Tobermorite. L'effet de l'incorporation des fibres est principalement significatif entre 100°C et 250 ° C avant toute fusion et carbonisation (Noumowe 2005) (Shatat 2016). On remarque un petit pic autour de 400 ° C. La phase qui subit une modification à cette température n'est pas clairement identifiée. H. Fares et al (Fares, Remond et al. 2010) ont cité deux travaux de Sha et al et de Persy et al. Les premiers ont expliqué ce pic par le changement cristallin ou la déshydratation d'une solution solide de Fe₂O₃. A l'inverse, Persy et al l'ont attribuée à la décomposition de la brucite (Mg (OH)₂).
- Entre 700 et 900 ° C, le carbonate de calcium se décompose et le CO₂ s'échappe du mortier. Ceci est dû à la décarbonatation du carbonate de calcium (Fares, Remond et al. 2010). La constatation qui mérite l'attention est la disparition du pic entre 450-550 °C qui correspond généralement la déshydroxylation de portlandite. On confirme que l'ajout de 30% de métakaolin consomme toute la Portlandite par la réaction pouzzolanique (Wei et Meyer 2015).

- *Après traitement thermique*

On remarque la disparition et la réduction de plusieurs pics. Ce qui correspond à la décomposition partielle ou totale de certaines phases au cours des traitements thermiques. Le chauffage des mortiers à 300 ° C, a fait fortement diminué les pics de l'eau libre, l'eau liée de CSH, l'étringite et le monocarboaluminate de calcium hydraté. Ainsi le pic à 400 ° C a disparu. Ce dernier indique l'absence de phase qui peut être la phase cristalline Brucite ou la solution solide de Fe₂O₃. Pour les mortiers chauffés à 600°C tous les pics entre 20 et 600°C ont été totalement éliminés. Enfin, le pic à 800°C correspond à la décarbonatation de carbonate de calcium.

5.4.3.8 *Observation par MEB*

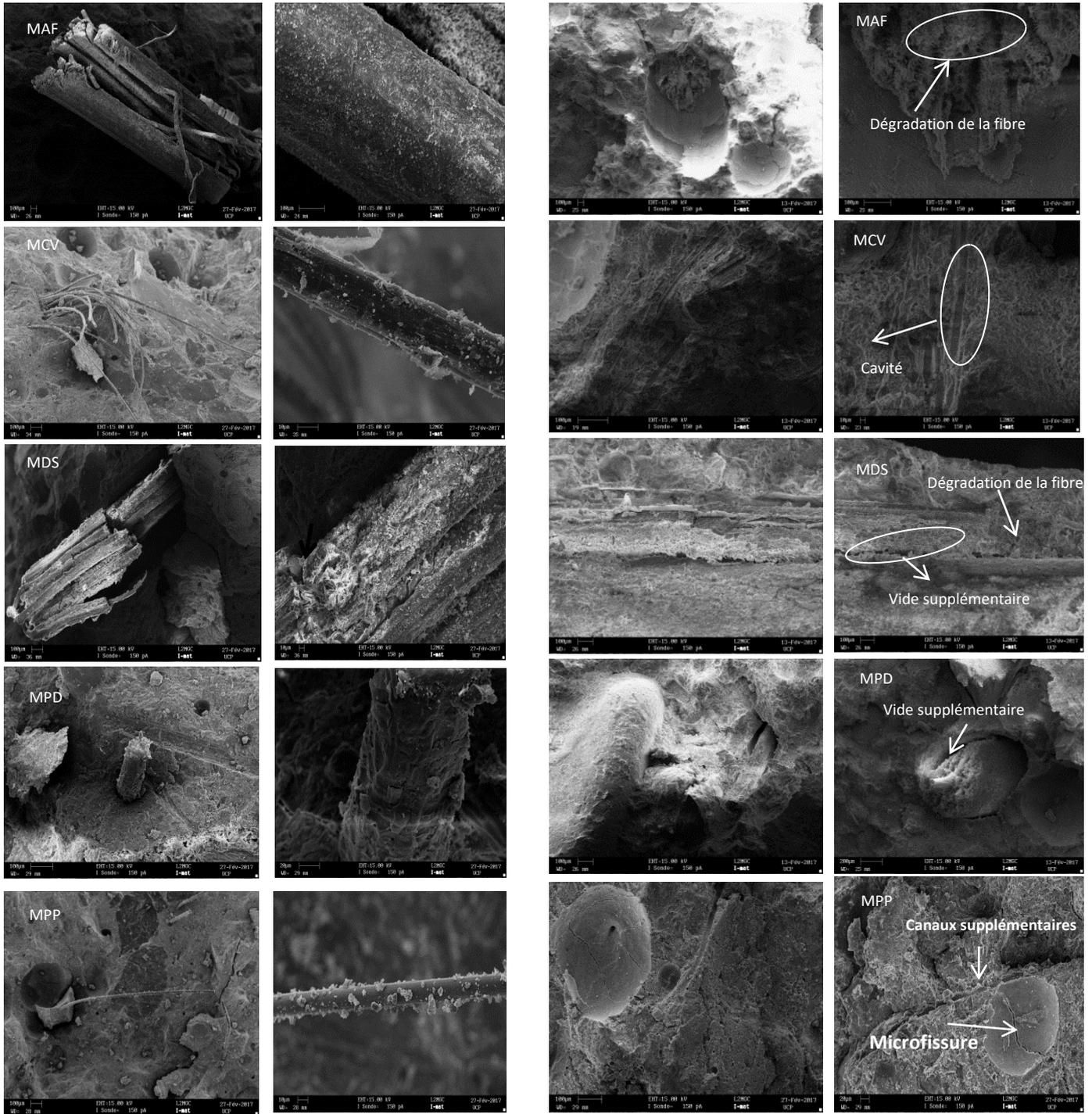
Les observations au MEB montrent des changements distincts de la morphologie des composants des mortiers soumis à des températures élevées (Zhou, Gao et al. 2015). La Fig.5-34 montre des photos micrographiques à l'aide du MEB des échantillons exposés à 20, 450 et 600 °C.

Fibres polypropylènes

Les fibres de Polypropylènes sont clairement observées dans les mortiers à 20 ° C. Par contre à 450 et 600°C elles ont disparu en laissant des canaux d'un diamètre d'environ 20 à 28µm. Harun Tanyildizi (Tanyildizi 2009) ont expliqué que la fibre de PP fond à 160-170 ° C et s'évapore à environ 340 ° C. Une petite microfissure a été observée à 450 ° C, alors qu'un assez grand nombre de micro fissures apparaissent dans les échantillons à la température de 600 ° C (Shatat 2016). Ces fissures internes conduisent à la détérioration de la microstructure de nos mortiers, ce qui engendre la diminution des performances mécaniques et l'augmentation de la porosité.

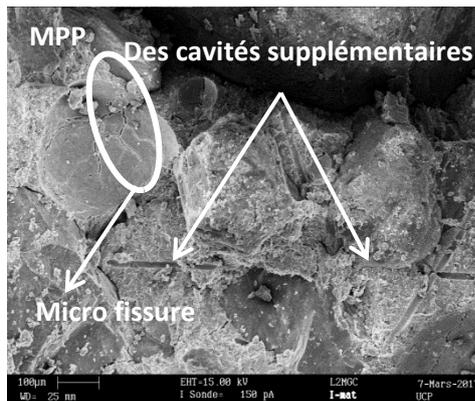
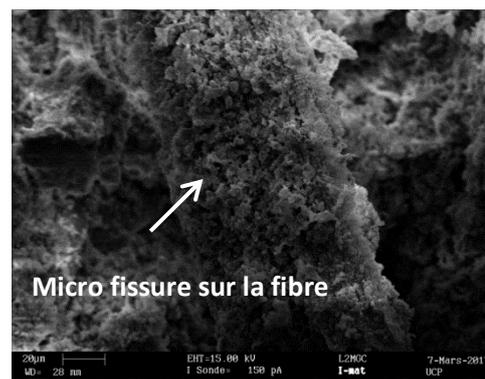
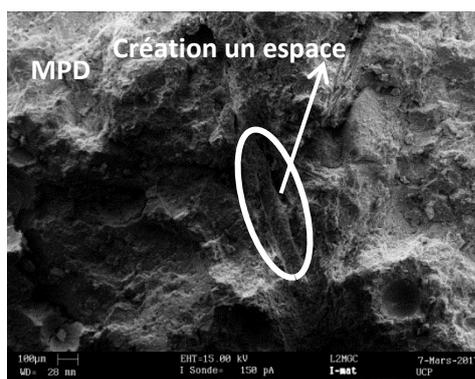
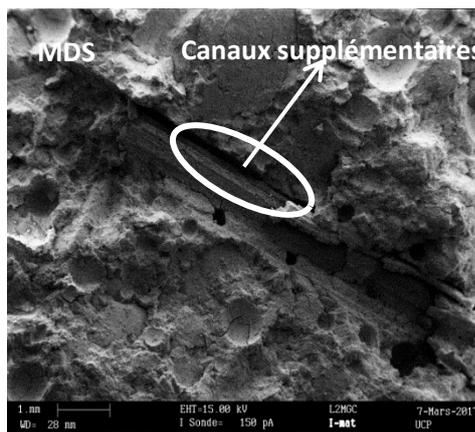
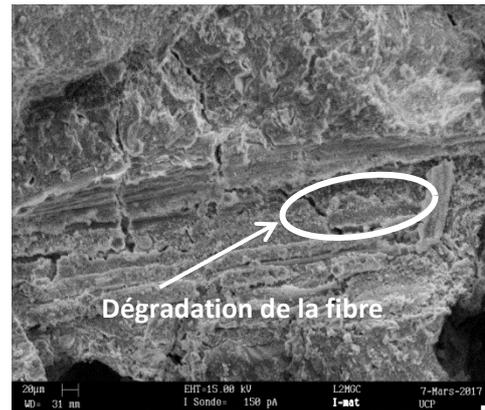
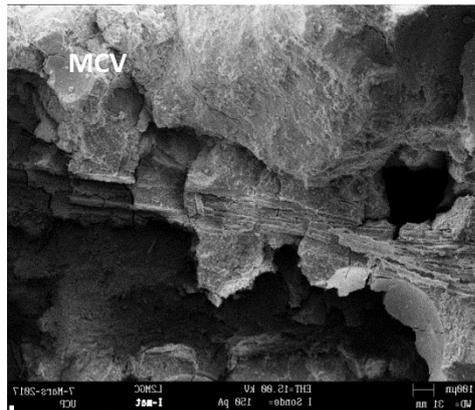
Les fibres végétales

À 20°C, on remarque que les fibres végétales sont intactes après 80 jours dans le mortier conservé à l'air ambiant. Ce qui confirme que le traitement avec l'hydroxyde de calcium et l'addition de 30% de metakaolin sont bénéfiques pour protéger les fibres végétales à long terme dans un milieu alcalin. A température élevée, on constate que ces fibres (végétales) présentent plusieurs types de dégradation. A titre d'exemple on observe qu'à 450°C la fibre de chanvre se dégrade et laisse des petits canaux comme la fibre de polypropylène. Tandis que les fibres de Dis, Alfa et Palmier dattier se dégradent à 600°C et créent des microfissures entre le renfort et de la matrice d'environ 40 à 80µm. Ainsi, on confirme à partir des observations au MEB que la décomposition des fibres crée des vides et des canaux supplémentaires comme on peut le remarquer sur la figure 5.34.



20°C

450°C



600°C

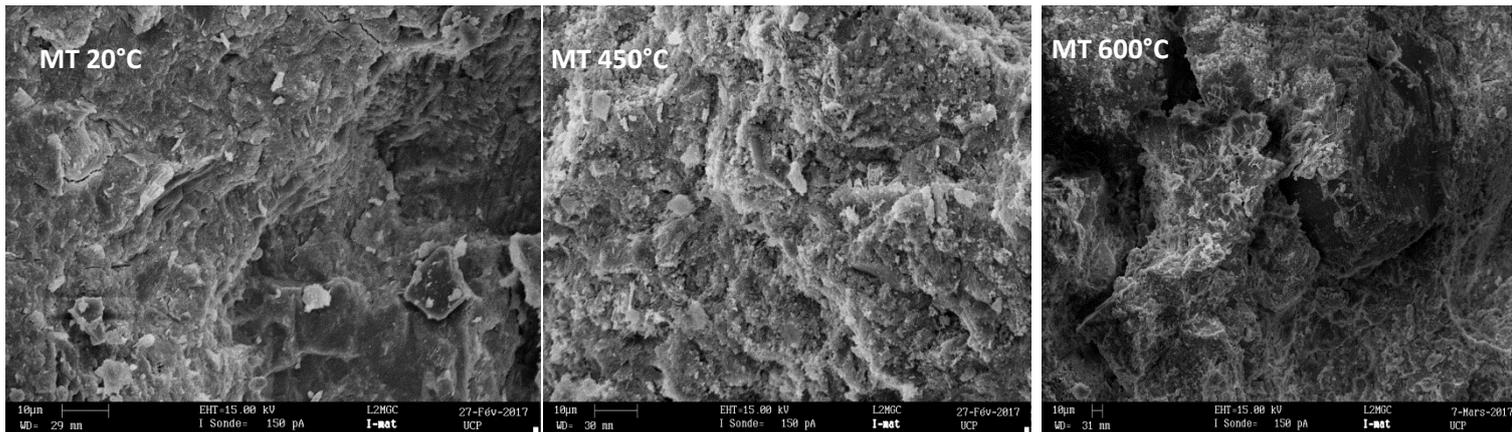


Figure 5-34 Observation au MEB des différents mélanges de MO à des températures de 20, 450 et 600°C.

5.5 Conclusion

- Les fibres végétales montrent une résistance à la traction élevée d'environ 173 à 619 MPa et une déformation maximale au pic entre 0.433 et 1.178 mm. Ces caractéristiques ont un effet important sur le comportement en flexion des matériaux cimentaires et la capacité de la déformation. L'analyse au MEB des FV dans les mortiers montre que ces renforts restent intacts même jusqu'à 90 jours. Le traitement chimique avec l'hydroxyde de calcium et la substitution de 30% de ciment par le metakaolin sont bénéfiques pour la durabilité des fibres dans les matériaux cimentaires à long terme.
- Les mortiers avec fibres végétales et polypropylènes empêchent les écaillages du béton. En effet, la carbonisation des fibres végétales et la fusion de PP créent des pores supplémentaires qui réduisent la pression interne dans les mortiers cimentaires durant l'incendie. L'augmentation de la résistance entre 150-300°C confirme par la réhydratation des particules de ciment anhydre existant dans le mortier. Le rapport de la diminution de la résistance des MFV est plus élevé que celui des MT. En outre, cette diminution varie selon la nature des fibres et leurs caractéristiques géométriques comme le diamètre. Les MT subissent qui ont subi des fissures superficielles (écaillage) plus grandes que celles des MF à 600°C à cause de la structure dense des mortiers sans fibres engendrent une accumulation de la pression de la vapeur dans les pores.
- La résistance à la flexion dépend des mêmes facteurs que celle en compression. Par contre sa cinétique de diminution est plus rapide que celle de la compression à cause des microfissures qui provoquent une chute rapide de la résistance.
- L'introduction des fibres végétales et des polypropylènes augmentent la porosité et diminuent la densité à cause de la création de vides supplémentaires;
- A température élevée, la vitesse d'impulsion diminue à cause de la fusion des fibres de PP et la carbonisation des fibres végétales;

- L'introduction des fibres, quelque soit leur nature (PP ou FV) diminue la conductivité thermique d'environ 15%. Cela rend le matériaux isolant. De plus, la conductivité diminue avec l'augmentation de la température.
- A partir des résultats de l'ATG des MT et MF, on confirme la substitution du ciment par 30% de métakaolin peut inhiber l'action de l'hydroxyde de calcium. C'est ce dernier qui est responsable du degré d'alcanité des matériaux cimentaires. Ainsi, la durabilité des fibres végétales dans les matériaux cimentaires est améliorée grâce à ce traitement.
- L'analyse micrographique au MEB montre que la dégradation de fibres végétale à 450 et 600°C varie selon la nature des fibres. On a trouvé que les fibres d'alfa, dis et palmier dattier se dégradent à 600°C avec d'environ 70%.
- La présence des fibres végétales dans les matériaux cimentaires facilite la pénétration du CO₂. Ce dernier réagi avec hydroxyde de calcium et le CSH.
- L'introduction des FV diminue légèrement les performances mécaniques des mortiers en environnement hivernal rigoureux. Mais elles restent plus résistance que la fibre de polypropylène.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre étude était de mettre en place des bétons autoplaçants renforcés par des fibres à faible impact environnemental à travers l'exploitation des fibres végétales tel que : Alfa, Dis, Palmier dattier, chanvre et chènevotte.

Pour mieux comprendre l'effet de ces fibres sur le comportement des matériaux cimentaires, nous avons décomposé notre travail en deux grands volets.

Le premier volet s'intéresse aux performances mécaniques et à la durabilité des bétons autoplaçants renforcés par des fibres végétales. Les résultats obtenus dans cette partie, montre que caractéristiques à l'état frais ainsi que les performances mécaniques à court et moyen terme de ces BAP à base de fibres végétales sont satisfaisants. Néanmoins, à 90 jours leurs résistances mécaniques chutent considérablement. Cela est dû à la dégradation des fibres végétales par le milieu alcalin du ciment.

L'analyse de la déformation différée des BAP comme le retrait (endogène et de dessiccation) a montré que les fibres ont une influence importante sur ce phénomène. Ainsi, globalement les BAP renforcés de fibres végétales ont présenté un retrait moins important que celui les BAP sans fibre. Par conséquent, on peut dire que les fibres végétales et en particulièrement la fibre de chanvre limitent le développement du retrait de dessiccation et d'endogène des bétons autoplaçants.

Concernant le fluage, généralement le potentiel de ce dernier diminue avec l'accroissement des propriétés mécaniques (Résistance en compression, en flexion et le module d'élasticité). Dans notre cas la présence des fibres végétales dans les BAP a conduit à une déformation instantanée plus élevée que celle du béton témoin (sans fibres) sauf dans le cas de la fibre de chènevotte. En effet, le BAP à base de chènevotte a montré une diminution considérable de sa flèche.

L'analyse des résultats du comportement des BAP renforcés de fibres végétales vis-à-vis de à l'élévation de la température a montré que ces derniers ne subissent pas d'effets d'écaillage. Alors que le BAP témoin a subi un écaillage explosif à 600°C, probablement à cause de sa structure dense. Donc les fibres végétales jouent un rôle bénéfique vis à vis de la dégradation des BAP par écaillage

Par ailleurs, nous avons remarqué une augmentation de la résistance mécanique entre 150°C et 300°C. Ce qui peut être expliqué par la réhydratation des particules de ciment anhydre existant dans le béton.

Pa contre les BAP à base de fibres végétale seraient sensibles aux cycles séchages mouillages probablement dû à la porosité supplémentaire créée dans ces matériaux.

Le deuxième volet s'intéresse aux performances mécanique et de la durabilité des mortiers cimentaires à base de métakaolin renforcés par des fibres végétales. Dans ce volet, les fibres végétales ont été préalablement traitées chimiquement.

La caractérisation de ces fibres végétales a montré qu'elles présentent une résistance à la traction élevée comprises entre 173 et 619 MPa et une déformation maximale entre 0.433 et 1.178 mm. Ces caractéristiques ont un effet bénéfique sur le comportement en flexion des matériaux cimentaires et leur capacité à la déformation.

Des observations au MEB faites à 90 jours sur des mortiers renforcés de fibres végétales montrent que ces dernières sont toujours intactes. En effet, le traitement chimique avec de l'hydroxyde de calcium et l'introduction de 30% de metakaolin sont efficace vis-à-vis de la durabilité des fibres végétales dans les matériaux cimentaires.

Concernant conductivité thermique, quel que soit la nature des fibres, celle-ci diminue d'environ 15%.

La carbonatation accélérée entraîne une densification importante du matériau grâce à la formation de CaCO_3 . Ainsi, ce phénomène entraîne un gonflement conduisant à des microfissures à plus long terme. Les fibres végétales, en particulier les palmiers-dattiers et le Dis se dégradent légèrement à cause de la forte présence de CO_2 .

Enfin, cette étude a permis de mettre en évidence le rôle important des fibres végétales sur le comportement mécanique et les propriétés de transfère des mortiers cimentaire. Ces fibres améliorent, notamment les performances mécaniques à court et moyen terme.

A noter, que le comportement des mortiers avec les fibres végétales est similaire à celui d'un mortier renforcé de fibres polypropylènes.

Concernant le comportement vis-à-vis de l'élévation de température, les mortiers avec les fibres végétales et les polypropylènes empêchent le phénomène d'écaillage. Ainsi, la carbonisation des fibres végétales et la fusion des fibres polypropylènes créent des pores supplémentaires qui réduisent la pression interne dans les mortiers cimentaires durant l'incendie.

Les fibres végétales sont fragiles vis-à-vis des cycles gèle dégel.

Enfin, on peut conclure que l'utilisation de fibres végétales dans les matériaux cimentaires contenant une poudre pouzzolanique reste possible. Néanmoins, ces fibres restent fragiles vis à vis du phénomène du gel-dégel et de la carbonatation.

Références bibliographiques

NF P18-404. "Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes." AFNOR.

NF EN 18-459. "Essai pour béton durci Essai de porosité et de masse volumique."

NF EN 933-3. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement."

NF EN 933-8+A1. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable."

NF EN 933-9+A1. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène."

NF EN 1097-1. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)."

NF EN 1097-2. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation."

NF EN 1097-3. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire."

NF EN 12350-9. "Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V".

NF EN 12350-10. "Essai pour béton frais - Partie 10 : béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L."

NF EN 12350-11. "Essai pour béton frais - Partie 11 : béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis."

NF EN 12350-12. "Essai pour béton frais - Partie 12 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'anneau."

NF EN 12390-5. "Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes."

NF EN 12504-4. "Essais pour béton dans les structures Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son."

NF EN 1352. "Détermination du module d'élasticité statique en compression du béton cellulaire autoclavé et du béton de granulats légers à structure ouverte."

NF EN 18-425. "Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau."

NF EN 18-458, X. "Essai pour béton durci - Essai de carbonatation accélérée - Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté."

NF EN 18-459. "Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique."

NF EN 18-463, X. "Bétons - Essai de perméabilité aux gaz sur béton durci."

NF EN 18-541. "Granulats - Guide pour l'élaboration du dossier carrière dans le cadre de la prévention des désordres liés à l'alcali-réaction."

Acker, P. and F.-J. Ulm (2001). "Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements." *Nuclear Engineering and Design* 203(2): 143-158.

Agopyan, V., H. Savastano Jr, V. John and M. Cincotto (2005). "Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview." *Cement and Concrete Composites* 27(5): 527-536.

Agoudjil, B., A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos and M. Fois (2011). "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and buildings* 43(2): 491-497.

Ahmed, S. A. (2013). "Properties and mesostructural characteristics of linen fiber reinforced self-compacting concrete in slender columns." *Ain Shams Engineering Journal* 4(2): 155-161.

Al-Saleh, S. A. and R. Z. Al-Zaid (2006). "Effects of drying conditions, admixtures and specimen size on shrinkage strains." *Cement and concrete research* 36(10): 1985-1991.

Ali, M., X. Li and N. Chouw (2013). "Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete." *Materials & Design* 44: 596-605.

Almeida, A., G. Tonoli, S. Santos and H. Savastano (2013). "Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age." *Cement and Concrete Composites* 42: 49-58.

Almeida Filho, F., B. E. Barragán, J. Casas and A. L. H. El Debs (2010). "Hardened properties of self-compacting concrete a statistical approach." *Construction and Building Materials* 24(9): 1608-1615.

Anastasiou, E. K., I. Papayianni and M. Papachristoforou (2014). "Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement." *Materials & Design* 59: 454-460.

Ardanuy, M., J. Claramunt, J. A. García-Hortal and M. Barra (2011). "Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers." *Cellulose* 18(2): 281-289.

Ardanuy, M., J. Claramunt and R. D. Toledo Filho (2015). "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research." *Construction and Building Materials* 79: 115-128.

Assié, S. (2004). "Béton Béton autonivelant Durabilité Durée de vie Microstructure Perméabilité Retrait Résistance mécanique " these de doctorat à l'université d'INSA de Toulouse.

A.S. El-Dieb, M.M. Reda Taha (2012). " Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC)" *Construction and Building Materials* 27: 585–596

ASTM, C. (2004). "1012." *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution,* ASTM International, West Conshohocken, PA.

Awwad, E., M. Mabsout, B. Hamad, M. T. Farran and H. Khatib (2012). "Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers." *Construction and Building Materials* 35: 710-717.

Ayed, K., A. Benaissa, A. Abidlah, N. Leklou and M. Mouli (2010). Amélioration des propriétés mécaniques des BAP par traitement mécanique des déchets de carrière de sable siliceux. SICZS_2010 Symposium International sur la construction en Zone Sismique.

Ayed, K., A. Benaissa, T. Vidal and G. Pons (2011). "Étude du retrait et du fluage des bétons autoplaçants à base de pouzzolanes naturelles et de fines siliceuses algériennes." *Canadian Journal of Civil Engineering* 39(1): 10-19.

Babafemi, A. J. and W. P. Boshoff (2015). "Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading." *Cement and Concrete Composites* 55: 62-69.

Bahloul, O., A. Bourzam and A. Bahloul (2009). Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa), sbeidco. 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria).

Bangi, M. R. and T. Horiguchi (2011). "Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures." *Cement and Concrete Research* 41(11): 1150-1156.

Bangi, M. R. and T. Horiguchi (2012). "Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures." *Cement and Concrete Research* 42(2): 459-466.

Banthia, N. and J. Sheng (1996). "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites." *Cement and Concrete Composites* 18(4): 251-269.

Baron, J. and R. Sauterey (1988). "Le béton hydraulique. 2 ème édition." Presses de l'école Nationale des Ponts et chaussées.

Bassuoni, M. and M. Nehdi (2009). "Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading." *Cement and Concrete Research* 39(3): 206-226.

- Bazant, Z. P., A. B. Høgggaard, S. Baweja and F.-J. Ulm (1997). "Microprestressing-solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects." *Journal of Engineering Mechanics* 123(11): 1188-1194.
- Behfarnia, K. and O. Farshadfar (2013). "The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack." *Construction and Building Materials* 38: 64-71.
- Behnood, A. and M. Ghandehari (2009). "Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures." *Fire Safety Journal* 44(8): 1015-1022.
- Belaidi, A. S. E., S. Kenai, E.-H. Kadri, H. Soualhi and B. Benchaâ (2016). "Effects of experimental ternary cements on fresh and hardened properties of self-compacting concretes." *Journal of Adhesion Science and Technology* 30(3): 247-261.
- Benboudjema, F. (2002). *Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires*, Université de Marne la Vallée.
- Benítez-Guerrero, M., J. López-Beceiro, P. E. Sánchez-Jiménez and J. Pascual-Cosp (2014). "Comparison of thermal behavior of natural and hot-washed sisal fibers based on their main components: Cellulose, xylan and lignin. TG-FTIR analysis of volatile products." *Thermochimica Acta* 581: 70-86.
- Benkechkache, G., B. Boukni and H. Houari (2008). Behaviour of the reinforced metal fibre concretes under request of pure inflection. The First International Engineering Sciences Conference-IESC.
- Benkechkache, G., A. Chabane and H. Houari (2010). étude expérimentale du retrait et du fluage des bétons autoplaçants à base des matériaux locaux. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, Editions ESKA.
- Benkechkache, G. and H. Houari (2009). "comparaison des retraits et fluages des betons autoplaçants et des betons ordinaires vibres." *Sciences & Technologie B*(30): 9-16.
- Benkechkache, G. and H. Houari (2011). "deferred behaviour of the self compacting concretes based local materials." *asian journal of civil engineering (building and housing)* 12(2): 219-232.
- Bensalem, S., C. Amouri, H. Houari and M. Belachia (2014). "Elaboration and characterization of self-compacting concrete based on local by-products." *International Journal of Engineering, Science and Technology* 6(1): 98-105.
- Bensebti, S., H. Houari and S. Aggoun (2008). *Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base des matériaux locaux*, Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université Mentouri Constantine.
- Berrocal, C. G., I. Löfgren, K. Lundgren and L. Tang (2015). "Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: influence of crack width, fibre type and loading conditions." *Corrosion Science* 98: 128-139.

- Bissonnette, B. and M. Pigeon (1995). "Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes." *Cement and Concrete Research* 25(5): 1075-1085.
- Bissonnette, B. t., P. Pierre and M. Pigeon (1999). "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials." *Cement and Concrete Research* 29(10): 1655-1662.
- Bosiljkov, V. B. (2003). "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler." *Cement and Concrete Research* 33(9): 1279-1286.
- Boukni, b. And h. Houari (2010). "etude de l'influence du rapport ciment/liant (c/l) et du mode de conservation sur le retrait des betons autoplacants." *Sciences & Technologie B*(31): 17-22.
- Bouziani, T., M. Bédérina, Z. Makhloufi and M. Hadjoudja (2014). "Mixture design approach to evaluate fresh properties of SCC made with various sands." *Journal of Building Materials and Structures* 1(1): 1-9.
- Brahim, S. B. and R. B. Cheikh (2007). "Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite." *Composites Science and Technology* 67(1): 140-147.
- C597-09, A. (2009). "Standard test method for pulse velocity through concrete. Philadelphia (USA): American Society for Testing and Materials " .
- Chabane, A. and H. Houari (2000). Contribution à l'étude du comportement différé des bétons sous sollicitation de flexion, Thèse de magister de l'Université de Constantine.
- Chabane, A. and H. Houari (2008). "Influence du type de granulats sur le fluage du béton." *Sciences & Technologie B*(27): 7-15.
- Chen, J.-K., J. Chen, G. Thomas, S. C. Kozma and R. C. Harris (2009). "S6 kinase 1 knockout inhibits uninephrectomy-or diabetes-induced renal hypertrophy." *American Journal of Physiology-Renal Physiology* 297(3): F585-F593.
- Chern, J.-C. and C.-H. Young (1989). "Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete." *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 11(4): 205-214.
- Choi, W.-C. and H.-D. Yun (2015). "Acoustic emission activity of CFRP-strengthened reinforced concrete beams after freeze-thaw cycling." *Cold Regions Science and Technology* 110: 47-58.
- Chu, H.-y., J.-y. Jiang, W. Sun and M. Zhang (2016). "Thermal behavior of siliceous and ferro-siliceous sacrificial concrete subjected to elevated temperatures." *Materials & Design* 95: 470-480.
- Colleparidi, M. (2003). "A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete." *Cement and Concrete Composites* 25(4): 401-407.

- Corinaldesi, V. and G. Moriconi (2011). "Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions." *Cement and Concrete Composites* 33(5): 596-601.
- Coutts, R. S. (2005). "A review of Australian research into natural fibre cement composites." *Cement and Concrete Composites* 27(5): 518-526.
- d'Almeida, A., J. Melo Filho and R. Toledo Filho (2009). "Use of Curaua Fibers as Reinforcement in Cement." *chemical engineering* 17.
- Da Silva, F., P. Helene, P. Castro-Borges and J. Liborio (2009). "Sources of variations when comparing concrete carbonation results." *Journal of materials in civil engineering* 21(7): 333-342.
- Dai, D. and M. Fan (2010). "Characteristic and performance of elementary hemp fibre." *Materials Sciences and Applications* 1(06): 336.
- de Almeida Melo Filho, J., F. de Andrade Silva and R. D. Toledo Filho (2013). "Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems." *Cement and Concrete Composites* 40: 30-39.
- de Andrade Silva, F., N. Chawla and R. D. de Toledo Filho (2008). "Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers." *Composites Science and Technology* 68(15): 3438-3443.
- de Andrade Silva, F., B. Mobasher and R. D. Toledo Filho (2009). "Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites." *Cement and Concrete Composites* 31(10): 721-730.
- de Andrade Silva, F., R. D. Toledo Filho, J. de Almeida Melo Filho and E. d. M. R. Fairbairn (2010). "Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites." *Construction and building materials* 24(5): 777-785.
- De Larrard, F. and T. Sedran (1999). *Une nouvelle approche de la formulation des bétons. Annales du BTP. laboratoire central des ponts et chaussées.*
- De Schutter, G., P. J. Bartos, P. Domone and J. Gibbs (2008). *Self-compacting concrete.*
- Dinakar, P., K. P. Sethy and U. C. Sahoo (2013). "Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag." *Materials & Design* 43: 161-169.
- Ding, Y., C. Azevedo, J. Aguiar and S. Jalali (2012). "Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature." *Construction and Building Materials* 26(1): 21-31.
- Diquélou, Y., E. Gourlay, L. Arnaud and B. Kurek (2015). "Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix." *Cement and Concrete Composites* 55: 112-121.
- Domone, P. (2007). "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete." *Cement and Concrete Composites* 29(1): 1-12.

- Domone, P. (2009). "Proportioning of self-compacting concrete—the UCL method."
- El-Dieb, A. and R. Hooton (1995). "Water-permeability measurement of high performance concrete using a high-pressure triaxial cell." *Cement and Concrete Research* 25(6): 1199-1208.
- El-Dieb, A. S. (2009). "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers." *Materials & Design* 30(10): 4286-4292.
- El Hilali, A. (2009). Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): influence des fines calcaires et des fibres végétales, Cergy-Pontoise.
- Fares, H., A. Noumowe and S. Remond (2009). "Self-consolidating concrete subjected to high temperature: mechanical and physicochemical properties." *Cement and Concrete Research* 39(12): 1230-1238.
- Fares, H., S. Remond, A. Noumowe and A. Cousture (2010). "High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties." *Cement and Concrete Research* 40(3): 488-496.
- Felekoglu, B. (2007). "Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)." *Resources, Conservation and Recycling* 51(4): 770-791.
- Ferrara, L., P. Bamonte, A. Caverzan, A. Musa and I. Sanal (2012). "A comprehensive methodology to test the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC)." *Construction and Building Materials* 37: 406-424.
- Ferrara, L., Y.-D. Park and S. P. Shah (2007). "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research* 37(6): 957-971.
- Garas, V. Y., L. F. Kahn and K. E. Kurtis (2009). "Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete." *Cement and Concrete Composites* 31(3): 147-152.
- García-Taengua, E., S. Arango, J. R. Martí-Vargas and P. Serna (2014). "Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state." *Construction and Building Materials* 65: 321-329.
- Ghafoori, N., H. Diawara and S. Beasley (2008). "Resistance to external sodium sulfate attack for early-opening-to-traffic Portland cement concrete." *Cement and Concrete Composites* 30(5): 444-454.
- Glasser, F. P., J. Marchand and E. Samson (2008). "Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions." *Cement and Concrete Research* 38(2): 226-246.
- Gram, H.-E. (1984). "Durability of natural fibres in concrete." Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries. ISSN : 0348-2626.

- Güneyisi, E., M. Gesoğlu and K. Mermerdaş (2008). "Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin." *Materials and Structures* 41(5): 937-949.
- Hadjoudja, M. (2014). Influence de l'incorporation des fibres métalliques sur les propriétés physico-mécaniques et sur le mécanisme de fissuration d'un béton de sable de dune.
- Hamzaoui, R., S. Guessasma, B. Mecheri, A. M. Eshtiaghi and A. Bennabi (2014). "Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes." *Materials & Design* 56: 60-68.
- Hanasaki, N., T. Inuzuka, S. Kanae and T. Oki (2010). "An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model." *Journal of Hydrology* 384(3-4): 232-244.
- Heirman, G., L. Vandewalle, D. Van Gemert, V. Boel, K. Audenaert, G. De Schutter, B. Desmet and J. Vantomme (2008). "Time-dependent deformations of limestone powder type self-compacting concrete." *Engineering Structures* 30(10): 2945-2956.
- Houari, H. (1993). "Contribution à l'étude du comportement des bétons renforcés des fibres métalliques soumis à l'action des charge maintenues et cycliques ", Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 244 p, 1993
- Hu, C., F. de Larrard, T. Sedran, C. Boulay, F. Bosc and F. Deflorenne (1996). "Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete." *Materials and Structures* 29(10): 620-631.
- Hwang, C. and C. Tsai (2005). The effect of aggregate packing types on engineering properties of self-consolidating concrete. SCC'2005-China: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, RILEM Publications SARL.
- John, V., M. Cincotto, C. Sjöström, V. Agopyan and C. Oliveira (2005). "Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre." *Cement and Concrete Composites* 27(5): 565-574.
- Jun, Z. and H. Stang (1998). "Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete." *Materials Journal* 95(1): 58-67.
- Kakooei, S., H. M. Akil, M. Jamshidi and J. Rouhi (2012). "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures." *Construction and Building Materials* 27(1): 73-77.
- Kalifa, P., F.-D. Menneteau and D. Quenard (2000). "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures." *Cement and concrete research* 30(12): 1915-1927.
- Kanadasan, J. and H. A. Razak (2014). "Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing." *Materials & Design* 56: 9-19.
- Khaleel, O. and H. A. Razak (2014). "Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate." *Materials & Design* 53: 691-700.

- Khaliq, W. and V. Kodur (2011). "Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures." *Cement and Concrete Research* 41(11): 1112-1122.
- Khatri, R., V. Sirivivatnanon and W. Gross (1995). "Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete." *Cement and Concrete Research* 25(1): 209-220.
- Khayat, K., A. Ghezal and M. Hadriche (1999). "Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete." *Materials and Structures* 32(9): 679-686.
- Kheder, G. F. and R. S. Al Jadiri (2010). "New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements." *ACI Materials Journal* 107(5).
- Khelidj, A., A. Loukili and G. Bastian (1998). "Etude expérimentale du couplage hydro-chimique dans les bétons en cours de maturation: incidence sur les retraits." *Materials and Structures* 31(9): 588-594.
- Kovler, K. and N. Roussel (2011). "Properties of fresh and hardened concrete." *Cement and Concrete Research* 41(7): 775-792.
- Kriker, A., G. Debicki, A. Bali, M. Khenfer and M. Chabannet (2005). "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate." *Cement and Concrete Composites* 27(5): 554-564.
- Kurtz, S. and P. Balaguru (2000). "Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure." *Cement and Concrete Research* 30(2): 183-190.
- Laifa, W., M. Behim, A. Turatsinze and T. Ali-Boucetta (2014). "Caractérisation d'un béton autoplaçant avec addition de laitier cristallisé et renforcé par des fibres de polypropylène et de diss." *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie* 29(1): 100-110.
- Lee, G., D. Han, M.-C. Han, C.-G. Han and H.-J. Son (2012). "Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete." *Construction and Building Materials* 34: 313-320.
- Leemann, A. and C. Hoffmann (2005). "Properties of self-compacting and conventional concrete—differences and similarities." *Magazine of Concrete Research* 57(6): 315-319.
- Leemann, A., P. Lura and R. Loser (2011). "Shrinkage and creep of SCC—The influence of paste volume and binder composition." *Construction and Building Materials* 25(5): 2283-2289.
- Li, Z., X. Wang and L. Wang (2006). "Properties of hemp fibre reinforced concrete composites." *Composites part A: applied science and manufacturing* 37(3): 497-505.
- Loser, R. and A. Leemann (2009). "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete." *Materials and structures* 42(1): 71-82.

- Lu, X., Q. Sun, W. Feng and J. Tian (2013). "Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method." *Construction and Building Materials* 47: 231-239.
- Magniont, C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Makani, A. (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différencié des bétons, Toulouse, INSA.
- Marangon, E., R. Toledo Filho and E. Fairbairn (2012). Basic creep under compression and direct tension loads of self-compacting-steel fibers reinforced concrete. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, Springer: 171-178.
- Mazaheripour, H., S. Ghanbarpour, S. Mirmoradi and I. Hosseinpour (2011). "The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete." *Construction and Building Materials* 25(1): 351-358.
- Mo, K. H., C. S. Bong, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat and S. P. Yap (2017). "Thermal conductivity, compressive and residual strength evaluation of polymer fibre-reinforced high volume palm oil fuel ash blended mortar." *Construction and Building Materials* 130: 113-121.
- Mohamed, M., E. Ghorbel and G. Wardeh (2010). "Valorization of micro-cellulose fibers in self-compacting concrete." *Construction and Building Materials* 24(12): 2473-2480.
- Mohammadhosseini, H., J. M. Yatim, A. R. M. Sam and A. A. Awal (2016). "Durability performance of green concrete composites containing waste carpet fibers and palm oil fuel ash." *Journal of Cleaner Production*.
- Mohr, B., J. Biernacki and K. Kurtis (2007). "Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites." *Cement and Concrete Research* 37(11): 1531-1543.
- Mouhoubi, S., H. Osmani, T. Bali and S. Abdeslam (2012). "Élaboration et étude des propriétés des composites Polyester-Alfa traitée et non traitée."
- Mwaikambo, L. Y. and M. P. Ansell (2002). "Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization." *Journal of Applied Polymer Science* 84(12): 2222-2234.
- Nawy, E. G. (1996). *Fundamentals of high strength high performance concrete*, Addison-Wesley Longman.
- Neville, A. (1996). *Properties of Concrete, Fourth and Final Edition Standards*, Pearson, Prentice Hall.
- Neville, A. (2004). "The confused world of sulfate attack on concrete." *Cement and Concrete Research* 34(8): 1275-1296.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*, Longman London.
- Noumowe, A. (2005). "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 C." *Cement and Concrete Research* 35(11): 2192-2198.

- Okamura, H. (1997). "Self compacting high performance concrete." *Concrete International* 19(7): 50-54.
- Okamura, H. and M. Ouchi (2003). "Self-compacting concrete." *Journal of advanced concrete technology* 1(1): 5-15.
- Okamura, H. and K. Ozawa (1994). "Mix design method for self-compactable concrete." *Doboku Gakkai Ronbunshu* 1994(496): 1-8.
- Orejarena, L. and M. Fall (2010). "Artificial neural network based modeling of the coupled effect of sulphate and temperature on the strength of cemented paste backfill." *Canadian Journal of Civil Engineering* 38(1): 100-109.
- Ozawa, M. and H. Morimoto (2014). "Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete." *Construction and Building Materials* 71: 83-92.
- Ozbay, E., A. Oztas, A. Baykasoglu and H. Ozbebek (2009). "Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method." *Construction and Building materials* 23(2): 694-702.
- Ozerkan, N. G., B. Ahsan, S. Mansour and S. R. Iyengar (2013). "Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars." *International Journal of Sustainable Built Environment* 2(2): 131-142.
- Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali (2011). "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review." *Construction and Building Materials* 25(2): 575-581.
- Persson, B. (2003). "Sulphate resistance of self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research* 33(12): 1933-1938.
- Petersson, O., P. Billberg and B. Van (1996). A model for self-compacting concrete. *Rilem proceedings*.
- Pimentel, L. L., A. L. Beraldo and H. Savastano Júnior (2006). "Durability of cellulose-cement composites modified by polymer." *Engenharia Agrícola* 26(2): 344-353.
- Pizzol, V., L. Mendes, H. Savastano, M. Frías, F. Davila, M. Cincotto, V. John and G. Tonoli (2014). "Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber–cement composites." *Construction and Building Materials* 68: 750-756.
- Proust, E. and G. Pons (2001). "Macroscopic and microscopic behavior of self-compacting concrete creep and shrinkage." *Proc. of Concreep* 6: 569-574.
- Ramli, M., W. H. Kwan and N. F. Abas (2013). "Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments." *Construction and Building Materials* 38: 554-566.

- Ranaivomanana, N., S. Multon and A. Turatsinze (2013). "Basic creep of concrete under compression, tension and bending." *Construction and Building Materials* 38: 173-180.
- Ranjani, G. I. S. and K. Ramamurthy (2012). "Behaviour of foam concrete under sulphate environments." *Cement and Concrete Composites* 34(7): 825-834.
- Raut, A. N. and C. P. Gomez (2016). "Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder." *Construction and Building Materials* 126: 476-483.
- Ray, I., Z. Gong, J. F. Davalos and A. Kar (2012). "Shrinkage and cracking studies of high performance concrete for bridge decks." *Construction and Building Materials* 28(1): 244-254.
- Recommendation, R. D. and P. D. R. DE LA RILEM (1995). "129-MHT: Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures." *Materials and Structures* 28: 410-414.
- Ringuette, B. (2011). *Matériaux composites à base de fibres de chanvre*, Université Laval.
- Rogge, E. (2009). "Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'Alfa (Esparto grass) en vue d'applications textiles." Mémoire de maîtrise pour l'obtention du grade académique de master, Génie des matériaux, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (UHA, Mulhouse, France), Année universitaire 2010.
- Rostami, V., Y. Shao, A. J. Boyd and Z. He (2012). "Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing." *Cement and Concrete Research* 42(1): 186-193.
- Rozière, E., A. Loukili, R. El Hachem and F. Grondin (2009). "Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks." *Cement and Concrete Research* 39(12): 1188-1198.
- Saak, A. W., H. M. Jennings and S. P. Shah (2001). "New methodology for designing self-compacting concrete." *Materials Journal* 98(6): 429-439.
- Saillio, M. (2012). *Interactions physico-chimiques ions-matrice dans les bétons sains ou carbonatés: influence sur le transport ionique*, Paris Est.
- Savastano Jr, H., P. Warden and R. Coutts (2001). "Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials." *Cement and concrete composites* 23(4-5): 389-397.
- Sebaibi, N., M. Benzerzour, Y. Sebaibi and N.-E. Abriak (2013). "Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard." *Construction and Building Materials* 43: 382-388.
- Sedan, D., C. Pagnoux, A. Smith and T. Chotard (2007). "Propriétés mécaniques de matériaux enchevêtrés à base de fibre de chanvre et matrice cimentaire." 18ème Congrès Français de Mécanique (Grenoble 2007).
- Sedan, D., C. Pagnoux, A. Smith and T. Chotard (2008). "Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction." *Journal of the European Ceramic Society* 28(1): 183-192.

- Sellami, A., M. Merzoud and S. Amziane (2013). "Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers." *Construction and Building Materials* 47: 1117-1124.
- Shatat, M. (2016). "Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin." *Arabian Journal of Chemistry* 9: S1869-S1874.
- Shi, C. and X. Yang (2005). Design and application of self-compacting lightweight concrete. SCC'2005-China: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, RILEM Publications SARL.
- Shi, H.-s., B.-w. Xu and X.-c. Zhou (2009). "Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete." *Construction and Building Materials* 23(5): 1980-1985.
- Siad, H. H. A. Mesbah, and S. Kamali Bernard (2010). Influence of natural pozzolan on the behavior of self-compacting concrete under sulphuric and hydrochloric acid attacks, comparative study. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35:183-195.
- Sideris, K. and P. Manita (2013). "Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures." *Construction and Building Materials* 41: 296-302.
- Soleymani Ashtiani, M., R. Dhakal and A. Scott (2011). Bond properties of reinforcement in high-strength self-compacting concrete. *Proceedings of the 9th Symposium on High Performance Concrete Design, Verification and Utilization*.
- Su, N., K.-C. Hsu and H.-W. Chai (2001). "A simple mix design method for self-compacting concrete." *Cement and concrete research* 31(12): 1799-1807.
- Sugamata, Y. E. T. and M. OUCHI (2003). A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests. *PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications.
- Tanyildizi, H. (2009). "Statistical analysis for mechanical properties of polypropylene fiber reinforced lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature." *Materials & Design* 30(8): 3252-3258.
- Tazawa, E.-i. (2014). Autogenous shrinkage of concrete, *Proceedings of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute)*.
- Toledo Filho, R. D., K. Ghavami, G. L. England and K. Scrivener (2003). "Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability." *Cement and concrete composites* 25(2): 185-196.
- Toledo Filho, R. D., K. Scrivener, G. L. England and K. Ghavami (2000). "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites." *Cement and concrete composites* 22(2): 127-143.

- Tonoli, G., U. Rodrigues Filho, H. Savastano Jr, J. Bras, M. Belgacem and F. R. Lahr (2009). "Cellulose modified fibres in cement based composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(12): 2046-2053.
- Tonoli, G., H. Savastano, E. Fuente, C. Negro, A. Blanco and F. R. Lahr (2010). "Eucalyptus pulp fibres as alternative reinforcement to engineered cement-based composites." *Industrial crops and products* 31(2): 225-232.
- Tonoli, G. H. D., A. P. Joaquim, M.-A. Arsène, K. Bilba and H. Savastano Jr (2007). "Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp." *Materials and Manufacturing Processes* 22(2): 149-156.
- Topçu, İ. B. and T. Uygunoğlu (2010). "Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)." *Construction and Building Materials* 24(7): 1286-1295.
- Tosun-Felekoğlu, K. (2012). "The effect of C 3 A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars." *Construction and Building Materials* 36: 437-447.
- Tosun, K., B. Felekoğlu, B. Baradan and İ. A. Altun (2009). "Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations." *Construction and Building Materials* 23(7): 2534-2544.
- Tshimanga, M. K. (2006). "Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons." *Revue Européenne de Génie Civil* 10(8): 1011-1011.
- Turcry, P. (2003). *Retrait et fissuration des bétons autoplçants : influence de la formulation* these de doctorat à l'université de Nantes.
- Turcry, P., S. Bonnet and G. Pijaudier-Cabot (2007). "Comportement mécanique de poutres attaquées par la corrosion: Utilisation du code de calcul Eficos." *Revue européenne de génie civil* 11(1-2): 195-211.
- Turcry, P., E. Roziere and A. Loukili (2005). "Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplçants." *XXIIemes Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble*.
- Valcuende, M. and C. Parra (2009). "Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes." *Construction and Building Materials* 23(1): 162-170.
- Valcuende, M., C. Parra, E. Marco, A. Garrido, E. Martínez and J. Cánoves (2012). "Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete." *Construction and Building Materials* 28(1): 122-128.
- Van Bui, A. (2002). "Shah, Rheological model for self-compacting concrete." *ACI Materials Journal* 99(6): 549-559.
- Viacava, I. R., A. A. de Cea and G. R. De Sensale (2012). "Self-compacting concrete of medium characteristic strength." *Construction and Building Materials* 30: 776-782.

- Vilanova, A., J. Fernandez-Gomez and G. A. Landsberger (2011). "Evaluation of the mechanical properties of self compacting concrete using current estimating models: Estimating the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture of self compacting concrete." *Construction and Building Materials* 25(8): 3417-3426.
- Wei, J. and C. Meyer (2014). "Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay." *Journal of Materials Science* 49(21): 7604-7619.
- Wei, J. and C. Meyer (2015). "Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites." *Cement and Concrete research* 73: 1-16.
- Xiao, J. and H. Falkner (2006). "On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures." *Fire Safety Journal* 41(2): 115-121.
- Ye, G., X. Liu, G. De Schutter, L. Taerwe and P. Vandeveldel (2007). "Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature." *Cement and Concrete Research* 37(6): 978-987.
- Z.P. Bažant, M. F. K. (1996). "Concrete at high temperatures." Longman Addison-Wesley, London, .
- Zhang, P. and Q.-f. Li (2013). "Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume." *Composites Part B: Engineering* 45(1): 1587-1594.
- Zhang, W., M. Zakaria and Y. Hama (2013). "Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete." *Construction and Building Materials* 49: 500-510.
- Zhao, Q., J. Yu, G. Geng, J. Jiang and X. Liu (2016). "Effect of fiber types on creep behavior of concrete." *Construction and Building Materials* 105: 416-422.
- Zhou, Y., J. Gao, Z. Sun and W. Qu (2015). "A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete." *Construction and Building Materials* 98: 137-145.
- Zhu, W. and J. C. Gibbs (2005). "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research* 35(8): 1457-1462.
- Zumbrunn, R., A. Markendorf, R. Loser and J. Dold (2007). Measurement system for determining six degrees of freedom of an object, Google Patents.

Annexe

Fiche technique du superplastifiant



We create chemistry

MasterGlenium 27

(Anciennement GLENIUM 27)

Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité

Description

Le **MasterGlenium 27** est un adjuvant non chloré à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du MasterGlenium

Le MasterGlenium se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment. Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du MasterGlenium dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires. Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Domaines d'application

Le MasterGlenium 27 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le MasterGlenium 27 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Propriétés et avantages

L'excellent effet de dispersion du MasterGlenium 27 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le MasterGlenium 27 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton :

Augmente

- La résistance à la compression à jeune âge et à long terme
- La résistance à la flexion à jeune âge et à long terme
- Le module d'élasticité
- L'adhérence sur les aciers
- La résistance à la carbonatation
- L'imperméabilité
- La résistance aux agressions atmosphériques
- La qualité des parements et de la texture du béton

Diminue

- La vibration
- Le retrait
- Le risque de fissuration
- Le fluage

Conditionnement

Container de 1000 litres, fût de 200 litres ou vrac.



We create chemistry

MasterGlenium 27

(Anciennement GLENIUM 27)

Caractéristiques

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Masse volumique à 25°C	1,05g/cm ³ +/-0,02
Chlorures	<0,01%
pH	6 +/-1
Na 2O équivalent	< 2%

Normes

Le MasterGlenium 27 est conforme aux normes :

- EN 934.2
- ASTM C-494 Type F&G
- BS EN 934-2

Mode d'emploi :

Le MasterGlenium 27 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du MasterGlenium 27 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le MasterGlenium 27 dans l'eau de gâchage.

Eviter d'ajouter le MasterGlenium 27 sur les granulats.

Compatibilité :

Le MasterGlenium 27 est compatible avec la majorité des ciments.

Le MasterGlenium 27 n'est pas compatible avec les superplastifiants MasterRheobuild.

Le MasterGlenium 27 est adapté pour les mélanges contenant des :

- Fumée de silice
- Cendres volantes
- Ciment de haut fourneau

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,3 à 3,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 2,86L pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

Stockage

MasterGlenium 27 doit être stocké à l'abri du soleil et protégé des températures extrêmes.

La durée de conservation est de 1 an lorsque il est stocké comme ci-dessus.

Précautions d'emploi :

Le MasterGlenium 27 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

Contrôle Qualité

Tous les produits élaborés par BASF ou importés par les sociétés filiales de BASF à travers le monde, sont certifiés conformes aux exigences des systèmes de gestion de qualité et d'environnement ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001.

* Les propriétés inscrites sont basées sur des tests de laboratoire contrôlé.

Les informations données sont réelles, représentent notre savoir actuel et sont basées non seulement sur des essais en laboratoire mais également sur les expériences du terrain. Cependant, du fait de nombreux facteurs affectant les résultats, nous offrons ces informations sans garantie et aucune responsabilité ne pourra nous être imputée. Pour plus d'informations ou de questions, contacter votre représentant local.

BASF Construction Chemicals Algérie SARL

Zone Industrielle Baba Ali, Dist 5, lot 3,
Saoula 16305
Alger
Algérie
Téléphone + 213 21 30 95 09
Fax +213 21 30 95 19

MASTER®
» BUILDERS
SOLUTIONS



We create chemistry

MasterGlenium 26

(Anciennement GLENIUM 26)

Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et très long maintien d'ouvrabilité

Description

Le **MasterGlenium 26** est un adjuvant non chloré à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du MasterGlenium

Le MasterGlenium se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment. Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du MasterGlenium dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires. Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Domaines d'application

Le MasterGlenium 26 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le MasterGlenium 26 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Il sera particulièrement recommandé pour les usages suivants :

- Bétons à très long maintien d'ouvrabilité
- Fondations profondes (parois moulées, pieux...etc.),
- Pompages longues distances,
- Bétons de bâtiment,
- Béton Auto Plaçant /Béton Auto Nivelant,
- Bétons de Génie Civil (ouvrages d'art, tunnels),
- Bétons à faible E/C et long maintien d'ouvrabilité.

Propriétés et avantages

L'excellent effet de dispersion du MasterGlenium 26 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le MasterGlenium 26 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton :

Augmente

- La résistance à la compression à jeune âge et à long terme
- La résistance à la flexion à jeune âge et à long terme
- Le module d'élasticité
- La résistance à la carbonatation
- L'imperméabilité
- La résistance aux agressions atmosphériques
- La qualité des parements et de la texture du béton

Diminue

- La vibration
- Le retrait
- Le risque de fissuration
- Le fluage

MASTER®
» BUILDERS
 SOLUTIONS



We create chemistry

MasterGlenium 26

(Anciennement GLENIUM 26)

Conditionnement

Container de 1000 litres, fût de 200 litres ou vrac.

Caractéristiques

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Masse volumique à 25°C	1.08g/cm ³ +/-0.02
Chlorures	<0.01%
pH	7 +/-1
Na ₂ O équivalent	< 2%

Normes

Le MasterGlenium 26 est conforme aux normes :

- ASTM C-494 Type F&G
- BS EN 934-2

Mode d'emploi :

Le MasterGlenium 26 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du MasterGlenium 26 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % d'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le MasterGlenium 26 dans l'eau de gâchage.

Eviter d'ajouter le MasterGlenium 26 sur les granulats.

Compatibilité :

Le MasterGlenium 26 est compatible avec la majorité des ciments.

Le MasterGlenium 26 n'est pas compatible avec les superplastifiants MasterRheobuild.

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,3 à 2,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 2,86L pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

Stockage

MasterGlenium 26 doit être stocké à l'abri du soleil et protégé des températures extrêmes.

La durée de conservation est de 1 an lorsque il est stocké comme ci-dessus.

Précautions d'emploi :

Le MasterGlenium 26 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

Contrôle Qualité

Tous les produits élaborés par BASF ou importés par les sociétés filiales de BASF à travers le monde, sont certifiés conformes aux exigences des systèmes de gestion de qualité et d'environnement ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001.

* Les propriétés inscrites sont basées sur des tests de laboratoire contrôlé.

Les informations données sont réelles, représentent notre savoir actuel et sont basées non seulement sur des essais en laboratoire mais également sur les expériences du terrain. Cependant, du fait de nombreux facteurs affectant les résultats, nous offrons ces informations sans garantie et aucune responsabilité ne pourra nous être imputée. Pour plus d'informations ou de questions, contacter votre représentant local.

BASF Construction Chemicals Algérie SARL

Zone Industrielle Baba Ali, Dist 5, Ilot 3,

Saoula 16305

Alger

Algérie

Téléphone + 213 21 30 95 09

Fax +213 21 30 95 19

MASTER®
» BUILDERS
 SOLUTIONS

Fiche technique du Metakaloin



ARGICAL 1200S

L'ARGICAL 1200S est une pouzzolane artificielle (Métakaolin), obtenue par calcination et broyage d'une argile kaolinique du Bassin des Charentes.

ARGICAL 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by calcining and micronising a kaolinic clay from the Charentes Basin.

L'ARGICAL 1200S est un silicate d'alumine déshydroxylé de composition générale : $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. C'est un matériau amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire.

ARGICAL 1200S is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. It is an amorphous non-crystallised material, whose particles are lamellar.

DOMAINE D'UTILISATION : Additif pour bétons, mortiers, revêtements à base de ciment Portland ou de chaux.

PRODUCT USE : Additive for concretes mortars and coatings made from Portland cement or lime.

COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE (%)

TYPICAL CHEMICAL ANALYSIS (%)

SiO ₂	55
Al ₂ O ₃	39
Fe ₂ O ₃	1,8
TiO ₂	1,5
K ₂ O + Na ₂ O	1
CaO + MgO	0,6

PERTE AU FEU (1050°C)

LOSS ON IGNITION (1050°C)

1 %

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES MOYENNES

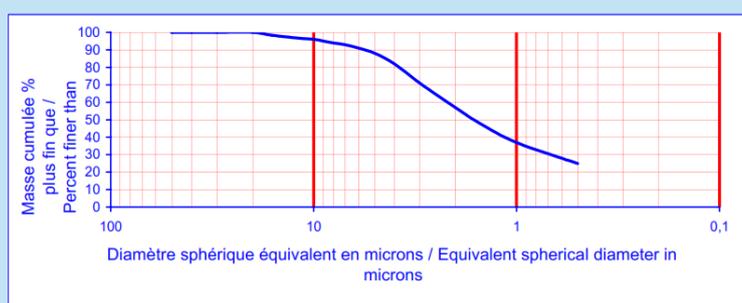
TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

pH	:	6
Indice pouzzolanique (essai Chapelle)	:	1200 mg Ca(OH) ₂ /g
<i>Pozzolanic index (Chapelle test)</i>		
Blancheur Photovolt filtre bleu	:	74
<i>Photovolt brightness blue filter</i>		
Surface spécifique BET	:	19 m ² /g
<i>Specific area BET</i>		
Demande en eau (Cône de Marsh)	:	1650 g/kg
<i>Water demand (Marsh cone)</i>		
Poids spécifique / <i>Specific gravity</i>	:	2,2 g/cm ³
Densité apparente / <i>Bulk density</i>	:	Non tassé / <i>Loose</i> : 250 kg/m ³
		Tassé / <i>Tamped</i> : 400 kg/m ³

REPARTITION GRANULOMETRIQUE

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

Inférieur à 2 µ : 55%



AGS - Siège Social et Service Commercial

17270 CLERAC France

Téléphone (+ 33) 5 46 04 17 11

Télécopie : (+33) 5 46 04 21 05

E-mail : commercial@ags-mineraux.com

CONDITIONNEMENTS

PACKAGING

Conteneur Souple / *Bag* (800 kg)

Sacs (15 kg) sur palette filmée / *Pallet* (900 kg)

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif. Les valeurs indiquées n'emportent pas obligation pour le fournisseur. Elles ne constituent en aucun cas une garantie sur le produit et sur ses spécifications. Seule la Fiche de Spécification Contractuelle dans le cadre de nos Conditions Générales de Ventes engage notre société auprès des clients.

Révision 1 du 15/10/03