

Université Paris Seine – Université de Cergy-Pontoise / Université Ferhat Abbas Sétif 1

**Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie
/ Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre**

Département Géosciences et Environnement / Département d'Architecture

**Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC)
/ Laboratoire Habitat et Environnement (LHE)**

**THESE EN COTUTELLE INTERNATIONALE présentée par :
Mohammed-Rissel KHELIFA**

Soutenue le 08 Novembre 2017

Pour l'obtention du :

Grade de docteur en Sciences de la Terre et de l'Univers de l'université de Cergy-Pontoise
/ Diplôme de docteur en sciences en Architecture de l'université Ferhat Abbas Sétif 1

***Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres
d'alfa pour des bâtiments verts et durables***

THESE dirigée par : Béatrice LEDESERT Tahar BELLAL Ronan Hebert	Professeur, Université de Cergy-Pontoise. Professeur, Université Sétif 1 (Algérie). HDR, Maitre de Conférences, Université de Cergy-Pontoise.
Rapporteurs : Mohamed BAHEDDI Karim AIT-MOKHTAR	Professeur, Université Batna 2 (Algérie) Professeur, Université de La Rochelle.
Jury : Abderezak DJEMILI Ronan HEBERT Maxime LION Ali-Nordine LEKLOU	Professeur, Université Sétif 1(Algérie), Président du jury Dr, EDF – Service Matériaux Génie Civil, Examineur. HDR, Maitre de Conférences, Université de Nantes, Examineur.



Sommaire

Remerciements.....	9
Introduction.....	11
Chapitre I : Etude bibliographique.....	18
I. Généralités sur les bétons.....	18
I. 1. Les bétons ordinaires (BO).....	19
I. 2. Les Bétons Hautes Performances (BHP).....	19
I. 3. Les bétons autocompactants ou autoplaçants (BAP) et autonivelants (BAN).....	19
I. 4. Les bétons de poudres réactives (BPR).....	20
I. 5. Les bétons fibrés (BF).....	20
I. 6. Historique des bétons.....	20
II. Utilisation des fibres dans le renforcement des bétons.....	22
II 1. Historique.....	22
II. 2. Types de fibres de renfort utilisés.....	23
II. 2. 1. Généralités.....	23
II 2. 2. Les fibres artificielles.....	23
II. 2. 3. Les fibres naturelles.....	24
II. 2. 4. Les fibres d'alfa.....	31
II. 3. Les bétons de fibres.....	36
II. 3. 1. Généralités.....	36
II. 3. 2. Les bétons de fibres naturelles.....	38
III. La durabilité des bétons.....	41
III. 1. Introduction.....	41
III. 2. L'attaque sulfatique.....	43
III. 2. 1. L'attaque sulfatique externe.....	44
III. 2. 2. Identification expérimentale de l'attaque sulfatique externe.....	46
III. 3. Comportement des bétons soumis à l'élévation de la température.....	47
III. 3. 1. Dégradation thermique des bétons.....	48
III. 3. 2. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé.....	50
III. 3. 3. Les paramètres qui favorisent l'instabilité thermique du béton.....	52
III. 3. 4. Transformation microstructurale de la matrice cimentaire.....	53
III. 3. 5. Comportement des granulats sous hautes températures.....	54
IV. Analyse de Cycle de Vie (ACV).....	55
IV. 1. Définition de l'ACV.....	55
IV. 2. Objectif de l'ACV.....	55



IV. 3. Etapes de l'ACV	56
IV. 4. L'ACV et le béton	56
V. Références bibliographiques	58
Chapitre II : Elaboration et caractérisation des éco-bétons	69
I. Introduction	69
I. 1. Etat de l'art	69
I. 2. Objectif et description du chapitre	71
II. Matériaux utilisés	71
II. 1. Matrice	71
II. 1. 1. Ciment	71
II. 1. 2. Superplastifiant	72
II. 2. Squelette	72
II. 2. 1. Granulats	72
II. 2. 2. Les fibres d'alfa	73
II. 2. 3. Les fibres de polypropylène	77
III. Formulation des différents bétons	77
IV. Confection des bétons	79
V. Caractérisation des différents bétons confectionnés	80
V. 1. A l'état frais : Ouvrabilité au cône d'Abrams	80
V. 2. A l'état durci	81
V. 2. 1. Le retrait	81
V. 2. 2. La perte de masse	82
V. 2. 3. Porosité totale à l'eau	83
V. 2. 4. Propriétés mécaniques (Résistances mécaniques et module de Young)	84
V. 2. 5. Observation au microscope électronique à balayage "MEB"	85
V. 3. Résultats et discussion	85
V. 3. 1. Essai d'affaissement ou Slump Test	85
V. 3. 2. Propriétés mécaniques	85
VI. Conclusions	97
VII. Références bibliographiques	99
Chapitre III : Etude de la durabilité des éco-bétons face à l'attaque sulfatique externe et à la sollicitation thermique	106
I. Introduction	106
II. L'attaque sulfatique externe	107
II. 1. Généralités	107
II. 2. Objectif de l'étude	109



II. 3. Matériel et méthodes.....	111
II. 3. 1. Matériel.....	111
II. 3. 2. Méthodes.....	113
II. 4. L'immersion complète.....	114
II. 4. 1. Protocole expérimental.....	114
II. 4. 2. Résultats et discussion.....	115
II. 4. 2. Conclusion.....	121
II. 5. Cycles d'immersion/séchage à 60°C.....	121
II. 5. 1. Protocole expérimental.....	122
II. 5. 2. Résultats et discussion.....	123
II. 5. 3. Conclusion.....	134
III. Durabilité vis-à-vis aux sollicitations thermique.....	134
III. 1. Méthodologie et programme expérimental.....	135
III. 1. 1. Analyse thermographique de la fibre d'alfa.....	136
III. 1. 2. Résistance à la compression simple.....	139
III. 1. 3. Perte de masse.....	140
III. 1. 4. Etude microscopique au MEB.....	141
III. 2. Conclusion.....	145
IV. Références bibliographiques.....	146
Chapitre IV : Analyse environnementale des bétons fibrés : comparaison des impacts liés aux fibres d'alfa et de polypropylène.....	151
I. Introduction.....	151
I. 1. Intérêt mécanique des fibres dans les bétons.....	151
1. 1. 1. Fibres de polypropylène dans les bétons.....	152
1. 1. 2. Fibres végétales dans le béton.....	152
I. 2. Analyse environnementale.....	152
I. 3. But de l'étude.....	153
II. Matériaux et méthodes.....	153
II. 1. Matériaux.....	153
II. 1. 1. Béton.....	153
II. 1. 2. Fibres de polypropylène.....	154
II. 1. 3. Fibres d'alfa.....	154
II. 2. Méthode.....	155
II. 2. 1. Analyse de cycle de vie (ACV).....	155
II. 2. 2. ReCiPe.....	157
II. 3. Unité fonctionnelle et limites du système.....	158



II. 4. Hypothèses et choix pour l'ICV	158
II. 4. 1. Alfa	158
II. 4. 2. Transport du polypropylène (PP)	159
III. Résultats	160
III. 1. Analyse comparative et interprétation	160
III. 1. 1. Caractérisation	160
III. 1. 2. Normalisation	163
III. 1. 3. Production de CO₂	165
IV. Conclusion	167
V. Remerciements	169
V. I. Références bibliographiques	169
Chapitre V : Conclusions générales et perspectives	173
V. 1. Conclusions générales	173
V. 1. 1. Formulation des bétons	173
V. 1. 2. Durabilité des bétons étudiés face à l'attaque sulfatique externe et à la sollicitation thermique	173
V. 1. 3. Analyse environnementale	174
V. 2. Perspectives	175
Bibliographie	177



Table des tableaux

Tableau I. 1. <i>Composition chimique (en % de masse) des fibres végétales les plus utilisées.....</i>	28
Tableau I. 2. <i>Propriétés physiques de différentes fibres végétales.....</i>	29
Tableau I. 3. <i>Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales.....</i>	30
Tableau I. 4. <i>La répartition territoriale de l'alfa.....</i>	32
Tableau I. 5. <i>Principales transformations de la matrice cimentaire sous hautes températures.....</i>	53
Tableau II. 1. <i>Composition chimique du ciment.....</i>	72
Tableau II. 2. <i>Pourcentages du clinker.....</i>	72
Tableau II. 3. <i>Proportions du mélange pour 1m³ et valeurs de l'affaissement des différents bétons... </i>	78
Tableau II. 4. <i>Les différents tests effectués sur les bétons.....</i>	79
Tableau II. 5. <i>Classes d'affaissement des différents types de bétons.....</i>	81
Tableau III. 1. <i>Proportions des différents bétons étudiés pour 1m³</i>	112
Tableau III. 2. <i>Nombre des éprouvettes utilisées pour l'immersion complète.....</i>	115
Tableau III. 3. <i>Nombre d'échantillons étudié.....</i>	123
Tableau III. 4. <i>Pente des droites Perte de masse en % = f(Température en °C).....</i>	141.
Tableau IV. 1. <i>Proportions du mélange pour 1m³ et valeurs de l'affaissement des différents bétons</i>	154

Table des figures

Figure I. 1. <i>Photos de quelques fibres animales.....</i>	27
Figure I. 2. <i>Classification des fibres végétales.....</i>	30
Figure I. 3. <i>Répartition géographique des steppes algériennes.....</i>	33
Figure I. 4. <i>Situation géographique de la région steppique en Algérie.....</i>	33
Figure I. 5. <i>La plante alfa sous formes de touffes circulaires.....</i>	34
Figure I. 6. <i>Morphologie de la plante alfa.....</i>	35
Figure I. 7. <i>Utilisation de l'alfa dans l'artisanat.....</i>	36
Figure I. 8. <i>Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques.....</i>	44
Figure I. 9. <i>Photo au MEB de l'ettringite secondaire sous forme de baguette dans un béton.....</i>	46
Figure I. 10. <i>Incendie du Colorado aux USA, le 27 juin 2012.....</i>	48
Figure I. 11. <i>Incendie de Tianjin en Chine, le 12 août 2015.....</i>	49
Figure I. 12. <i>Illustration du mécanisme de l'éclatement hydraulique du béton.....</i>	51
Figure I. 13. <i>Principales hypothèses de l'éclatement du béton.....</i>	52
Figure I. 14. <i>Dégagement des poussières à la cimenterie de Ain –Touta (Algérie).....</i>	57.
Figure I. 15. <i>Impact du SO₂ sur l'état des feuilles de haricots verts.....</i>	57
Figure II. 1. <i>La plante alfa dans son environnement naturel.....</i>	70
Figure II. 2. <i>Emplacement géographique de la ville de Djelfa (Algérie) d'où provient l'alfa.....</i>	73
Figure II. 3. <i>Photos de la feuille d'alfa au MEB.....</i>	74
Figure II. 4. <i>Feuilles d'alfa découpées en fibres de 2 à 3 cm de longueur.....</i>	75
Figure II. 5. <i>Fibre d'alfa immergée dans de l'eau.....</i>	75
Figure II. 6. <i>Courbe de séchage de l'alfa à 40°C.....</i>	76
Figure II. 7. <i>Fibres de polypropylène utilisées (EURO320DC).....</i>	77
Figure II. 8. <i>Principaux types de retrait du béton.....</i>	82
Figure II. 9. <i>Dispositif utilisé pour la détermination de la porosité totale à l'eau par la méthode de triple pesée.....</i>	84
Figure II. 10. <i>Test de compression simple réalisée sur un béton AC-2.....</i>	86
Figure II. 11. <i>Résistance à la compression à 28 et 112 jours des bétons étudiés.....</i>	86
Figure II. 12. A: <i>Essai brésilien effectuée sur un béton AC-2.5.....</i>	87
Figure II. 13. <i>Résistance à la traction à 28 et 112 jours des bétons étudiés.....</i>	88
Figure II. 14. <i>Module d'Young des différents bétons confectionnés à 28 jours.....</i>	89.
Figure II. 15. <i>Porosité des différents bétons étudiés à 28 jours.....</i>	90.
Figure II.16. <i>Exemple de la distribution des fibres de Alfa pour les éprouvettes de béton cylindriques AC-2.5.....</i>	91

Figure II. 17. Evolution du retrait total des quatre bétons sélectionnés.....	92
Figure II. 18. Evolution de la masse totale des bétons sélectionnés.....	93
Figure II. 19. Image MEB des bétons OC (A), AC-1.5 (B) et PC (C) montrant la répartition des fibres dans le mélange.....	97
Figure III. 1. Présence d'une forte teneur en sel sur un sol.....	108
Figure III. 2. Echantillons de roches gypseuses qui existent dans les sols.....	108
Figure III. 3. Origine de la pollution de l'atmosphère, exemple d'une cimenterie.....	109
Figure III. 4. Echantillons de bétons de dimension 7x7x28 cm.....	112
Figure III. 5. Scie ayant servie au découpage des éprouvettes 7x7x28 cm en 7x7x7 cm.....	112
Figure III. 6. Cube 7x7x7 cm découpé à partir de l'éprouvette 7x7x28 cm.....	113
Figure III. 7. Diagramme de phase de la cristallisation des sels.....	114
Figure III. 8. Immersion des échantillons de béton dans l'eau dosée à 12,5%.....	115
Figure III. 9. Pesée des masses des échantillons.....	116
Figure III. 10. Suivi de masse en fonction de l'âge des bétons confectionnés.....	117
Figure III. 11. Zoom sur le suivi de masse entre 0 et 50 jours des bétons confectionnés.....	118
Figure III. 12. Tests de compression simple des échantillons.....	119
Figure III. 13. Résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons étudiés.....	119
Figure III. 14. Photos des échantillons après 18 mois d'immersion totale.....	120
Figure III. 15. Protocole expérimental de l'immersion/séchage à 60°C.....	122
Figure III. 16. Suivi macroscopique.....	124
Figure III. 17. Suivi de masse après séchage du béton OC en immersion/séchage à 60°C dans une solution saline à 12.5% en NaSO ₄	125
Figure III. 18. Suivi de masse après séchage du béton AC-0.1 en immersion/séchage à 60°C dans une solution saline à 12.5% en NaSO ₄	126
Figure III. 19. Suivi de masse après séchage du AC-1 en immersion/séchage à 60°C dans une solution saline à 12.5% en NaSO ₄	127
Figure III. 20. Suivi de masse en fonction de l'âge de tous les bétons étudiés.....	128
Figure III. 21. Résistance à la compression en fonction de l'âge de tous les bétons étudiés.....	129
Figure III. 22. Microscope électronique à balayage de L2MGC.....	130
Figure III. 23. Machine de métallisation.....	130
Figure III. 24. Vacuole du BO.....	131
Figure III. 25. Surface du béton ordinaire.....	131
Figure III. 26. Présence nombreuse d'aiguilles d'ettringite dans les vacuoles du béton OC.....	131
Figure III. 27. Vacuole du OC zoomée.....	131
Figure III. 28. Vacuole du béton AC-1.....	132
Figure III. 29. Vacuole zoomée du béton AC-1.....	132

Figure III. 30. <i>Vacuole du béton AC-1</i>	132
Figure III. 31. <i>Vacuole zoomée du béton AC-1</i>	132
Figure III. 32. <i>Surface du béton renforcé de fibres de polypropylène PC</i>	133
Figure III. 33. <i>Zoom de l'interface fibres/pâte de ciment hydraté pour le PC</i>	133
Figure 34. <i>Vacuole du béton PC</i>	133
Figure III. 35. <i>Vacuole du béton PC zoomée</i>	133
Figures III. 36. <i>Four électrique programmable de dimension 1,3 x 1,04 x 1,04 m</i>	135
Figure III. 37. <i>Analyse thermique (ATG/ATD) de la fibre d'alfa</i>	137
Figure III. 38. <i>Résistance à la compression en fonction de la température</i>	139
Figure III. 39. <i>Perte de masse en fonction des températures des bétons AC-1.5, PC et OC</i>	140
Figure III. 40. <i>MEB de OC à température ambiante</i>	142
Figure III. 41. <i>MEB de OC à 610°C</i>	142
Figure III. 42. <i>MEB du PC à température ambiante</i>	143
Figure III. 43. <i>MEB de PC à 610°C</i>	143
Figure III. 44. <i>MEB de AC-1.5 à température ambiante</i>	144
Figure III. 45. <i>MEB de AC-1.5 à 610°C</i>	145
Figure IV. 1. A - <i>Champs d'Alfa sur les hauts plateaux algériens aux alentours de la ville de Djelfa. B</i> <i>- Touffe d'Alfa dont la hauteur est d'environ 1m</i>	155
Figure IV. 2. <i>Évaluation des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie</i>	156
Figure IV. 3. <i>Etapas constituant une ACV</i>	157
Figure IV. 4. <i>Caractérisation des impacts des fibres PP produites en Belgique</i>	161
Figure IV. 5. <i>Caractérisation des impacts des fibres alfa produite en Algérie</i>	162
Figure IV. 6. <i>Comparaison des impacts de caractérisation pour l'alfa et des fibres de polypropylène FPP : Belgique et Marseille</i>	162
Figure IV. 7. <i>Normalisation des impacts des fibres de polypropylène produites en Belgique</i>	163
Figure IV. 8. <i>Normalisation des impacts des FA produites en Algérie</i>	164
Figure IV. 9. <i>Comparaison des impacts normalisés des fibres de polypropylène et de l'alfa</i>	165
Figure IV. 10. <i>Emission négative de CO₂ lors de la production de l'alfa</i>	165
Figure IV. 11. <i>Emission positive de CO₂ lors de la production de PP à Marseille</i>	166
Figure IV. 12. <i>Comparaison des émissions de CO₂ pour les fibres de l'alfa et de polypropylène</i>	167

Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
اللهم صل على محمد و على آل محمد كما صليت على إبراهيم و على آل إبراهيم و بارك على محمد و على آل محمد كما باركت على إبراهيم و
على آل إبراهيم في العالمين انك حميد مجيد

Ce travail a été réalisé au laboratoire Géosciences et Environnement de l'université de Cergy-Pontoise (université Paris Seine) dont je remercie les directeurs depuis mon inscription jusqu'à ce jour de m'avoir permis de réaliser la plus grande partie de ma thèse.

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma gratitude envers tous les membres du jury de soutenance pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail : Monsieur Abderrazak Djemili, professeur à l'Université Sétif 1, que je remercie d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, Monsieur Abdelkarim Ait-Mokhtar et Monsieur Mohamed Baheddi, respectivement professeur à l'université de La Rochelle et professeur à l'université Batna 2 d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, Monsieur Ronan Hebert, HDR et maître de conférences à l'université de Cergy-Pontoise pour son encadrement, sa disponibilité et son aide précieuse tout au long de la préparation et de la rédaction de ma thèse. Je remercie également Monsieur Nordine-Ali Leklou, Maître de Conférences HDR à Polytech'Nantes de m'avoir accueilli et accompagné le long de la formulation et la confection de mes éprouvettes de bétons à l'institut de recherche de génie civil de Saint-Nazaire. Merci à Monsieur Maxime Lion, Docteur à EDF, service matériaux de génie civil d'avoir accepté de participer au jury de ma soutenance en tant qu'examinateur.

Je remercie mes directeurs de thèses, Madame Béatrice Ledesert, professeur à l'université de Cergy-Pontoise qui a dirigé ma thèse ainsi que Monsieur Tahar Bellal, professeur à l'université Sétif 1 pour ses conseils et son encadrement.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Brahim Gharbi, responsable des relations extérieures de la Faculté de Technologie de l'université Batna 2 pour son amitié et ses encouragements ainsi que pour son aide lors de mes déplacements à l'université de Cergy-Pontoise.

Merci à tous les responsables de l'Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre ainsi que les membres du Laboratoire «Habitat et Environnement» de l'université de Sétif 1, pour leur aide financière pour mes déplacements à l'université de Cergy-Pontoise.

Je remercie vivement Madame Assia Samai-Bouadjadja, Directrice-adjointe Chargée de la Post Graduation, de la Recherche Scientifique et des Relations Extérieures à l'université Ferhat Abbas Sétif 1, pour son aide, sa disponibilité même en période de congés et pendant les week-ends, sans elle, ma soutenance n'aurait pas eu lieu dans les délais et dans de bonnes conditions.

Merci aussi à Madame Soria Guemmaz, Chef de Service de la Post Graduation de l'Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre de l'université Ferhat Abbas Sétif 1, à Monsieur Bogart Gustave, Gestionnaire des Ecoles Doctorales SI et EM2P de l'Université de Cergy-Pontoise et à Madame Danielle Lacoeuilhe, secrétaire en retraite au Département Géoscience et Environnement pour leur bon accueil, leur aide et leur disponibilité tout le long de ma scolarité.

Merci aussi à mes chers étudiants du département Socle Commun Sciences et Technologies d'avoir accepté les multiples changements de leurs emplois du temps, leurs gentillesse, leur aide et leurs encouragements durant toute l'année 2016/2017 et jusqu'à ce jour.

Les innombrables souvenirs accumulés durant ces années de thèse sont autant de reflets des innombrables personnes que j'ai côtoyées. Que chaque personne dont j'ai croisé la route soit assurée qu'elle a gagné sa place dans mes souvenirs et mon estime, Thibault Harle, Oliver Tronel, Lilian Cristofol, Hamza Soualhi, Samir Mahli, Jean-Christian Colombier, Céline Maffre,.....

Je remercie ma famille et plus particulièrement ma mère pour ses encouragements et son soutien moral et financier, je lui dédie ce travail.



Introduction générale

Introduction générale

Dans cette introduction nous présenterons le contexte général de notre étude, comme l'historique, la confection et l'utilisation des bétons de fibres en général et les bétons de fibres naturelles en particulier, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Nous nous intéresserons aussi aux fibres naturelles existantes en Algérie et plus particulièrement la fibre d'alfa et son éventuelle utilisation dans la confection des bétons de structure comme fibre de renforcement. Une présentation des grandes parties de ce travail de recherche exposera les différentes étapes développées tout le long de ce mémoire.

Contexte général de l'étude

Actuellement, le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années ; les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants et autonivelants (BAP et BAN). Le béton est sujet à continuelle évolution tant en matière de performances mécaniques, que dans sa composition, en particulier son association avec d'autres matériaux, comme l'acier, les fibres, ..., pour l'amélioration de sa durabilité ou encore dans la substitution de certaines de ses composantes comme par exemple, le remplacement de certaines fibres synthétiques par des fibres naturelles pour limiter son impact l'environnemental.

Le secteur du BTP est confronté à plusieurs défis environnementaux pour plusieurs raisons, à savoir :

- une forte consommation de ressources naturelles telles que les granulats, le sable et l'eau;
- une forte consommation d'énergie pour la production de matériaux de construction, principalement celle du ciment qui représente 5 à 7% des émissions mondiales de CO₂;
- une forte consommation d'énergie pendant l'exploitation des bâtiments;
- son impact sanitaire (amiante, composés organiques volatils (COV),);
- un rôle socio-économique en tant que secteur d'emploi majeur.

Le besoin de logements, d'infrastructures et d'équipements publics augmentera rapidement dans un proche avenir en raison de l'évolution de la croissance démographique mondiale qui pourrait atteindre les 9,6 milliards prévus en 2050 (source ONU).

Le béton, qui est le matériau le plus utilisé au monde après l'eau, contribue de manière significative à ce bilan négatif.

Depuis le début du 21^{ème} siècle, l'impact environnemental d'une construction dans les pays occidentaux est lié aux matériaux. Par conséquent, l'industrie de la construction doit se tourner vers le développement de matériaux innovants pour réduire l'impact environnemental des matières premières pour répondre aux enjeux d'une construction durable.

Historique des bétons fibrés

L'extension des constructions à travers le monde et même dans les zones les plus arides et les plus retirées ont poussé les chercheurs à améliorer les performances mécaniques des bétons et leur durabilité face aux nouveaux types de dégradations (attaque sulfatique externe, gel/dégel, carbonatation,.....). Pour cela, d'autres matériaux sont intégrés dans les bétons, pour les rendre plus performants et plus durables face à ces dégradations, telles les fibres utilisées comme renfort. C'est une technique très ancienne qu'utilisaient les romains dans la fabrication de composites, comme par exemple, l'utilisation de la paille pour renforcer l'argile ou encore le crin pour renforcer certains mortiers et plâtres.

Les fibres de renfort participent à conférer aux composites leurs caractéristiques mécaniques comme la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Elles peuvent améliorer aussi certaines de leurs propriétés physiques telles que le comportement thermique, la résistance au feu et la résistance à l'abrasion. Les qualités recherchées pour les fibres sont leurs caractéristiques mécaniques élevées (résistance à la traction), leur masse volumique faible, la facilité de leur mise en œuvre et leur faible coût. Elles sont classées selon leur origine (naturelle ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille,...), leurs dimensions (macro ou microfibrilles) et leurs propriétés mécaniques.

La variation continue du prix du pétrole, la prise en compte des contraintes environnementales et la nécessité d'utiliser des matériaux locaux, biodégradables, recyclables et renouvelables conduisent les industriels à renouer avec l'utilisation des fibres naturelles et particulièrement végétales dans le textile, le bâtiment, la plasturgie et l'automobile. Ils œuvrent pour le renforcement des productions locales et l'indépendance économique vis-à-vis des produits importés pour des raisons de coût de revient et de respect de l'environnement.



Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées à la place des fibres synthétiques comme les fibres de polypropylène, de verre ou de carbone dans le domaine du génie civil ou comme renfort de polymère de type polychlorure de vinyle (PVC), polyéthylène (PE) ou polypropène (PP) dans l'industrie en général.

Les fibres naturelles d'origine végétale les plus considérées dans l'industrie et particulièrement dans le domaine de la construction sont les fibres de coton, de lin, de chanvre, de palmier dattier, de diss, de paille, de sisal, de jute, de kenaf, de coco ou encore Les fibres d'alfa. Ces dernières sont jusqu'à présent peu utilisées mais ont un potentiel que nous avons étudié dans cette thèse.

Utilisation des fibres d'alfa dans le renforcement des bétons en Algérie

L'alfa est une plante sauvage endémique qui pousse sous forme de touffes dans les régions arides du pourtour méditerranéen. Sa répartition territoriale montre que l'Algérie est le premier pays, en termes d'extension des aires de croissance d'alfa, dans le monde.

L'abondance et les caractéristiques de l'alfa dans le bassin méditerranéen et plus particulièrement en Afrique du nord ont intéressé l'homme depuis longtemps et l'ont poussé à l'exploiter d'une manière intensive. En effet les feuilles de cette plante présentent un intérêt socio-économique majeur de par la finesse, la résistance et la souplesse de ses fibres. Son exploitation nécessite toujours une main d'œuvre importante, ce qui contribue fortement au maintien de l'emploi de la population locale et empêche ainsi l'exode rural et contribue au maintien de l'écosystème en formant une barrière contre la désertification qui avance à pas de géant dans le nord de l'Afrique.

Le déclin de l'industrie papetière et cordelière a conduit à la réduction des débouchés de l'alfa, ce qui s'est traduit par une perte d'activité économique, d'où l'intérêt de trouver de nouvelles applications pour relancer une activité autour de cette plante.

Depuis quelques années, les chercheurs et industriels s'intéressent de très près à la confection de nouveaux composites renforcés de fibres végétales destinés au domaine du bâtiment et du génie civil. L'alfa étant disponible en grande quantité, il nous a paru utile de nous intéresser à sa valorisation dans le domaine de la construction.

Ces recherches ont pour but l'utilisation et le développement des ressources naturelles et locales tout en intégrant l'aspect socio-économique des pays, surtout dans le contexte actuel, où l'inflation de certains matériaux de construction comme le ciment, l'acier,..., favorise l'exploitation et l'utilisation des matériaux locaux, en plus de leur impact positif sur l'environnement et sur la vie sociale des habitants.

Plusieurs études sur des fibres naturelles, comme le sisal, le jute, l'alfa, le chanvre, le lin, l'agave, le palmier dattier, le coco..., ont été menées pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques et particulièrement leur résistance à la traction en vue de les incorporer comme fibres de renfort dans des matériaux pour le secteur automobile ou dans des matériaux de construction. Trois aspects ont été abordés à chaque fois, à savoir, l'environnement, la maniabilité et la fissuration.

Les objectifs de l'étude

Le travail présenté dans ce mémoire a deux objectifs principaux, 1) étudier la pertinence des fibres d'alfa dans la fabrication des bétons de structure et 2) la substitution des fibres synthétiques de polypropylène, pour cela on :

- confectionne des bétons renforcés de fibres naturelles d'alfa à différents pourcentages et on les compare avec un béton ordinaire et un béton renforcé de fibres de polypropylène (bétons témoins).
- étudie la durabilité des bétons renforcés de fibres d'alfa vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe (pollutions industrielles ou construction sur des sols gypseux) et vis-à-vis d'une sollicitation thermique.

Le travail de recherche réalisé au cours de cette thèse est présenté en quatre grandes parties :

La **première partie** est consacrée à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et des définitions sur les bétons en général, sur les fibres, sur les bétons renforcés de fibres, sur l'alfa, sur l'attaque sulfatique externe, sur la durabilité thermique des bétons et enfin sur l'analyse de cycle de vie (ACV).

La **seconde partie** du mémoire est consacrée à la valorisation des fibres d'alfa dans la confection de « bétons verts »(bétons renforcés de fibres d'alfa) destinés à la construction d'éléments de structure avec des propriétés mécaniques appropriées. Dans un premier temps, les matériaux entrant dans la composition du béton d'alfa seront présentés ainsi que la formulation retenue.

Les méthodes d'analyse sont ensuite présentées. Enfin, les résultats concernant les caractéristiques et propriétés des bétons à l'état frais puis durci seront présentées et suivies d'une interprétation et d'une conclusion intermédiaire.

Dans la **troisième partie** nous nous intéresserons à la durabilité des bétons d'alfa vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe et de l'élévation de la température.

En effet, l'attaque sulfatique, se produit lors d'un apport suffisant en sulfates (construction sur sol gypseux, par exemple). Les sulfates peuvent réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates), pour produire de l'ettringite secondaire conduisant éventuellement à un gonflement du béton et à sa fissuration à long terme. Pour cela, deux protocoles d'attaque sulfatique ont été utilisés:

- une immersion totale à long terme.
- des cycles immersion/séchage à court terme.

Par ailleurs, en cas d'incendie ou dans des cas d'utilisation particulière, le béton subit une augmentation de température et se dégrade, voyant chuter ses propriétés mécaniques. Il est indispensable d'explorer cette dégradation. Les différents bétons formulés durant cette thèse ont été soumis à des sollicitations thermiques entre 20°C et 610°C, en passant par des paliers à 170°C et 360°C.

Enfin, une étude macroscopique a été menée pour suivre la dégradation au cours du temps pour chacun des cas (attaque sulfatique et élévation de température). Cette étude englobe la mesure de la variation de la masse des échantillons, l'évolution de la porosité des différents bétons et le suivi visuel. Des analyses à l'échelle microscopique telle que la microscopie électronique à balayage (MEB) et l'analyse thermogravimétrique (ATG) ont été menées. Cette dernière étude apporte des informations complémentaires à l'étude macroscopique dans l'objectif d'étayer les discussions concernant la nature des dégradations observées.

La **quatrième partie** est consacrée à l'analyse de cycle de vie de nos bétons, effectuée à l'aide du logiciel Simapro. Elle montre que l'utilisation de fibres végétales sauvages locales réduit considérablement les impacts environnementaux des bétons, en particulier l'émission de CO₂, gaz à effet de serre et l'appauvrissement des ressources fossiles. De ce fait, si l'utilisation des



bétons fibrés ne peut être évitée, en particulier en zone sismique, l'utilisation de cette ressource locale peut apporter un bénéfice à l'environnement.

Enfin, une **conclusion générale** est dressée à partir des résultats obtenus dans les différents chapitres. Les **perspectives** du travail de recherche proposées pourront faire l'objet d'études complémentaires, notamment sur la caractérisation plus poussée et le vieillissement accéléré des fibres naturelles seules pour mieux connaître le processus de dégradation des fibres naturelles dans le cas du renforcement des bétons de structure tout en respectant l'environnement.



Chapitre I : Etude bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique

A travers les différents paragraphes de ce chapitre, nous allons nous intéresser à la composition et la confection des bétons de fibres en général et ceux de fibres naturelles plus particulièrement, que nous appellerons "éco-bétons". Les fibres d'alfa et les bétons de fibres d'alfa seront au cœur de ce chapitre. Nous nous pencherons aussi sur les études antérieures concernant l'attaque sulfatique externe des bétons comme thème de durabilité et le comportement des bétons sous l'élévation de la température.

I. Généralités sur les bétons

Le béton est composé de matériaux généralement d'origine minérale. Il met en présence plusieurs matériaux afin de les agglomérer entre eux. Des matières inertes comme les "granulats" (gravier et sable), généralement issus de roches calcaires ou siliceuses, avec du ciment ou de l'argile, appelés "liants" mélangé à l'eau ou du bitume, ainsi que des produits chimiques dits "adjuvants" pour modifier les propriétés physiques et chimiques du composite. Mélangés avec de l'eau, ces matériaux forment une pâte dont l'homogénéité varie d'un mélange à un autre selon leur utilisation. On peut avoir un béton moulé en atelier pour les constructions préfabriquées ou coulé sur chantier pour les constructions dites en béton banché. Le béton durcit avec le temps, on dit qu'il fait prise.

Le rapport indique le nombre de litres d'eau de gâchage par kilogrammes de ciment (E/C). Il a une grande importance pratique. Il permet en premier lieu de se faire une idée sur l'état de la pâte de ciment correspondant à chaque mélange de béton ou de mortier. Plus la valeur numérique de ce rapport est petite, plus la pâte du ciment est concentrée et plus sa force de liaison est élevée. Au contraire, plus elle est grande, plus la pâte de ciment est diluée et fluide. C'est l'un des paramètres majeurs conditionnant la porosité et la résistance de la matrice cimentaire du béton durci. Plus la valeur de E/C est petite, plus les résistances en compression des béton sont élevées et plus leur porosité diminue [1], [2].

On distingue:

- Les bétons de terre, qui sont les plus anciens de tous les bétons, ils sont à base d'argile.
- Les bétons bitumeux, lorsque le bitume est utilisé comme liant, etc....

- Les bétons de ciment, lorsque le liant est un ciment. Ce sont les bétons les plus utilisés à l'heure actuelle pour la construction et qui font l'objet de notre étude.

Généralement, lorsqu'on parle de béton, ce terme désigne le béton de ciment. Lorsque ce dernier est associé à de l'acier, on obtient un "béton armé", qui est le béton le plus confectionné au monde.

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Plusieurs types de bétons de ciment sont actuellement sur le marché de la construction parmi lesquels :

I. 1. Les bétons ordinaires (BO)

Appelés aussi bétons vibrés, bétons courants ou encore bétons traditionnels. Ils sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2500 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints [3].

I. 2. Les Bétons Hautes Performances (BHP)

Ce sont des bétons qui possèdent de meilleures caractéristiques que les bétons normaux ou ordinaires comme :

- Une meilleure résistance à la compression, d'où une réduction de la quantité de béton nécessaires.
- Une plus grande fluidité grâce aux superplastifiants, ce qui permet une meilleure mise en œuvre sans la nécessité de vibrer le béton pour avoir une surface lisse.
- Un apport en eau plus faible.

De par leur forte compacité et leur très faible porosité qui empêchent la pénétration des agents agressifs dans le béton, protègent les armatures de la corrosion et augmentent la résistance des bétons au phénomène de gel/dégel, les BHP présentent une plus grande durabilité que les bétons ordinaires [4].

I. 3. Les bétons autocompactants ou autoplaçants (BAP) et autonivelants (BAN)

Ces bétons se distinguent des bétons ordinaires par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont caractérisés par une très grande fluidité grâce aux superplastifiants et aux agents colloïdaux,

sont homogènes, stables et leur mise en œuvre nécessite pas de vibrations. Leurs performances à l'état durci sont analogues à celles des bétons traditionnels mis en œuvre par vibration [3]. Ils confèrent à la structure un parement esthétique de qualité et sont destinés à des ouvrages de grande hauteur. Lorsqu'il s'agit d'un ouvrage horizontal de faible épaisseur comme dans le cas des planchers, c'est le terme BAN qui est utilisé. Le terme BAP caractérise les ouvrages verticaux comme les poteaux.

I. 4. Les bétons de poudres réactives (BPR)

Les bétons de poudres réactives sont des micro-bétons armés de micro-armatures dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. La porosité des BPR est réduite au maximum car ils contiennent des sables très fins ($\leq 600 \mu\text{m}$), leur teneur en eau est très faible, un dosage très élevé en ciment et en fumée de silice ainsi que l'utilisation d'un superplastifiant leur confèrent des performances mécaniques élevées voire exceptionnelles et une meilleure durabilité. Le prix des BPR est de plus en plus élevé et limite leur utilisation aux cas où les autres bétons ne répondent pas à certaines exigences techniques et architecturales [5].

I. 5. Les bétons fibrés (BF)

Ce sont des bétons dans lesquels sont incorporées des fibres synthétiques, métalliques ou naturelles. Ces dernières renforcent le béton comme dans le cas d'un béton armé. Ils permettent une mise en œuvre plus rapide et plus facile du fait de la suppression de la mise en place du ferrailage ainsi que la limitation de la fissuration grâce aux fibres dispersées dans le composite [4]. C'est le cas des chapes renforcées de treillis ou de fibres métalliques.

I. 6. Historique des bétons

Mortiers et chaux étaient utilisés depuis des millénaires. Des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau étaient utilisés pour la construction par les Chinois, les Égyptiens et les Mayas. Les Romains fabriquaient des liants hydrauliques, comme en témoigne Vitruve dans ses Dix livres d'architecture. C'est eux qui ont découvert au début de notre ère que le mortier pouvait prendre en mélangeant du mortier de la terre de Pouzzole (pouzzolane) issue de cendres volcaniques avec de l'eau. Ce principe est resté longtemps inexpliqué jusqu'à la fin du XVIIIe siècle où plusieurs ingénieurs le redécouvrent et cherchent à le comprendre expérimentalement [6].



Le béton est le matériaux de construction le plus utilisé dans le monde, il subit une continuelle évolution tant dans l'amélioration de ses performances mécaniques, que sur son association avec d'autres matériaux, comme l'acier, les fibres, ..., pour l'amélioration de sa durabilité ou encore dans la substitution de certaines de ses composantes comme par exemple, le remplacement de certaines fibres synthétiques par des fibres naturelles pour limiter son impact sur l'environnement.

Durant des décennies, les chercheurs se sont préoccupés surtout de l'amélioration des résistances à la compression des bétons, principale caractéristique d'un béton de structure mais sa faible résistance à la traction et sa prédisposition à la microfissuration sont ses principaux points faibles, d'où la nécessité dans la plupart des cas de le renforcer avec des armatures en acier, des câbles ou encore des fils de précontraintes, qui sont utilisés jusqu'à ce jour et sont nécessaires selon les critères auxquels doit répondre le mélange (zone de construction, hauteur de la structure,.....).

L'extension des constructions à travers le monde et même dans les zones les plus arides et les plus retirées ont poussé les chercheurs à améliorer les performances mécaniques des bétons et leur durabilité face aux nouveaux types de dégradations (attaque sulfatique externe, gel/dégel, carbonatation,.....). Pour cela d'autres matériaux sont intégrés dans les bétons pour les rendre plus performants et plus durables face à ces dégradations telles les fibres utilisées comme renfort. C'est une technique très ancienne qu'utilisaient nos prédécesseurs dans d'autres composites, comme par exemple, l'utilisation de la paille pour renforcer l'argile ou encore le crin pour renforcer certains mortiers et plâtres.

Le ciment est le principal composant du béton, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance. C'est une poudre minérale fine obtenue par le broyage et la cuisson à 1 450°C, d'un mélange de calcaire et d'argile appelée clinker. Ce matériau granulaire est pour l'essentiel une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Sa production indispensable pour la construction et le développement de tous les pays mais sa grande consommation d'énergie lors de la cuisson di clinker dégage des poussières qui polluent l'atmosphère et mettent en danger la vie humaine et l'agriculture avoisinant les cimenteries. Elle est responsable d'approximativement 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques qui sont le responsable majeur du réchauffement climatique. De

plus, l'utilisation accrue des sables des plages dans la confection des bétons de ciment a des conséquences néfastes sur l'environnement et conduit à la destruction des écosystèmes littoraux [7].

II. Utilisation des fibres dans le renforcement des bétons

L'utilisation des fibres dans le béton améliore sa résistance résiduelle et sa durabilité. Elle permet le renforcement de la structure ainsi qu'une meilleure répartition des contraintes.

II. 1. Historique

Les technologies de renforcement des bétons et plus particulièrement le béton armé ont été développées depuis plusieurs années pour ralentir le plus possible la détérioration au cours du temps de ces matériaux. Les critères les plus importants pris en compte par ces technologies sont :

- La diminution des contraintes de mise en œuvre et le coût du renforcement utilisé,
- La durabilité de la structure renforcée.
- Le collage de plaques d'acier est l'une des premières méthodes de renforcement des structures en béton. Cette méthode a amélioré la résistance et la rigidité de la structure et à réduit considérablement les fissures. Néanmoins, trois inconvénients pourraient compromettre l'utilisation de ces plaques d'acier, à savoir :
- La complexité de la mise en place des plaques métalliques en raison leur taille et de leur poids,
- La corrosion des plaques au niveau de l'interface avec le béton armé, qui peut conduire à la détérioration de la structure et même à sa ruine.
- Le prix des plaques surtout depuis l'envolée des prix de l'acier.
-

Une deuxième méthode consiste à renforcer le béton par des plaques en matériaux composites textile de renforcement, lamelles, fibres de verre ou de carbone,...) associé à des matrices polymères thermodurcissables (résine époxydes, polyester,...). L'utilisation de cette technique dans le domaine de la construction est assez récente, elle date des débuts des années 2000 [8], [9].

L'utilisation de fibres pour renforcer le béton est une technique qui se développe de plus en plus depuis quelques années. Elle consiste à incorporer dans le béton une armature par

inclusion directe de fibres isolées au moment du gâchage ou de la projection. Les fibres sont considérées comme un granulats spécial de forme allongée et de résistance à la traction élevée, elles sont susceptibles d'améliorer la résistance à la traction du matériau, de ralentir la propagation des fissures et ce, en améliorant le comportement post fissuration de la matrice en maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations [10].

Cette idée est très ancienne et date de l'antiquité quand les pharaons ont utilisé des pailles pour renforcer la brique de boue

II. 2. Types de fibres de renfort utilisés

II. 2. 1. Généralités

Les fibres de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques comme la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Elle peuvent améliorer aussi certaines de leurs propriétés physiques telles que le comportement thermique, la résistance au feu et la résistance à l'abrasion. Les qualités recherchées des fibres sont leurs caractéristiques mécaniques élevées, leur masse volumique faible, la facilité de leur mise en œuvre et leur faible coût [8].

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille,...), leur dimension (macro ou microfibrilles) et leurs propriétés mécaniques, on distingue :

II 2. 2. Les fibres artificielles

Les plus utilisées dans le domaine de la construction sont les fibres de verre, les fibres métalliques et les fibres synthétiques.

Sous forme massive, le verre est caractérisé par une très grande fragilité due à sa sensibilité élevée à la fissuration, mais sous forme d fibres de faible diamètre, il possède de bonnes résistances mécaniques avec un taux de silice compris de 50 à 70%. L'inconvénient majeur des fibres de verre est leur sensibilité

Les fibres métalliques font partie des fibres artificielles les plus utilisées dans le renforcement des mortiers et des bétons et font l'objet de beaucoup d'études de recherches à ce jour. Ce type

de fibres regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe. Elles sont classées en deux catégories :

- les fibres plates ayant une surface spécifique importante. Elles sont peu ductiles et fonctionnent par adhérence. Leur rôle principal est la limitation de l'ouverture des fissures.
- Les fibres cylindriques en acier tréfilé ayant un comportement ductile. Elles fonctionnent par ancrage assuré par des crochets aux extrémités de fibre ou par la forme ondulée de la fibre. Elles confèrent une bonne ductilité au béton.

Le faible coût des produits dérivés du pétrole après la seconde guerre mondiale a fait que des fibres synthétiques comme le nylon, le polyester, l'acrylique et le polypropylène ont envahi le marché du textile et ont remplacé les fibres naturelles. A la fin du 19^{ème} siècle, la production mondiale de fibres synthétiques a dépassé celle des fibres naturelles et l'écart n'a cessé de se creuser jusqu'aux années 2000 [11], [12]. Ces fibres à base de produits pétrochimiques sont produites en masses avec une diversité dans les longueurs et les couleurs de la fibre selon la demande du consommateur et une uniformité dans la qualité et les performances mécaniques. Nous nous intéresserons dans notre étude à ces fibres et plus particulièrement aux fibres de polypropylène. Ces dernières sont obtenues par extrusion du polypropylène et se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Elles sont rajoutées au béton lors du malaxage et se répartissent séparées de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres de polypropylène permettent un meilleur contrôle du retrait plastique du béton et améliorent sa maniabilité et sa cohésion. Elles sont souples, insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion entre 140 et 170°C).

L'avantage majeur du béton de fibres de polypropylène est leur résistance à la fissuration due au "premier retrait" ainsi que leur résistance aux chocs.

II. 2. 3. Les fibres naturelles

Près de 35 millions de tonnes de fibres naturelles sont récoltées chaque année. Cette quantité représente près du tiers de la production mondiale de fibres textiles. Ces fibres sont d'origine animale comme les fibres de moutons, des chèvres, ou d'alpagas [13] ou d'origine végétale comme les fibres de chanvre, de lin, d'alfa, de tiges de jute, de sisal et de coton. Toutes ces



fibres sont utilisées pour la confection de tissus, de cordes et de ficelles et jouent un rôle très important dans la vie socio-économique de la population locale. Les fibres naturelles sont récoltées en général par des ouvriers saisonniers et arrachées principalement à la main.

Après la flambée du prix du pétrole et la prise en compte des contraintes environnementales et l'utilisation des matériaux locaux, biodégradables et recyclables, les industriels renouent avec l'utilisation des fibres naturelles et particulièrement végétales dans le textile, le bâtiment, la plasturgie et l'automobile. Ils œuvrent pour le renforcement des productions locales et l'indépendance économique vis-à-vis des produits importés pour des raisons de coût de revient et de respect de l'environnement [14].

De nombreuses ressources en fibres naturelles ont été explorées au fil du temps pour l'industrie textile et l'artisanat. Suivant la finesse, la résistance et la longévité des fibres produites, ces différentes ressources sont utilisées pour la production de vêtements, de tissus, de tapis, de cordages ou de sacs de manutention. Concurrencées dans ces secteurs par les fibres textiles artificielles et synthétiques, elles trouvent parfois de nouveaux débouchés dans l'industrie papetière ou dans la construction, particulièrement pour leurs bonnes performances mécaniques, leur biodégradabilité et leur faible coût [15].

Les fibres végétales sont utilisées à la place des fibres synthétiques comme dans le cas des fibres de verre ou de carbone dans le domaine du génie civil ou comme renfort de polymère de type PVC, PE ou PP dans l'industrie en général [16], [17].

Des études de recherche [18], [19] ont montré que l'utilisation des polymères et des fibres végétales s'étend jusqu'au domaine du bioplastique et la fabrication de certains accessoires de l'automobile. Le chanvre, le lin, le sisal et même l'abaca renforcent les accoudoirs, les tablettes arrières, les dossiers de sièges ou les boucliers de moteurs. En Europe, leur utilisation dans l'industrie de l'automobile était estimée à 100 000 tonnes en 2010. En Allemagne, la firme BMW utilise jusqu'à 24 kg de fibres de sisal ou de lin dans la fabrication de certaines séries [18].

Dans le domaine de la construction, on incorpore dans le béton du chanvre pour la réalisation de dalles isolantes ou le montage de murs. La chènevotte et la laine de chanvre issue des tiges

de chanvre broyées sont une solution de substitution pour la laine de verre. Comme le précise Dallel M. [14], les isolants naturels présentent de nombreux atouts environnementaux: performance d'isolation thermo-acoustique, capacité de régulation hygrométrique et faible énergie grise pour leur fabrication, recyclabilité et piégeage du carbone de l'air pour les fibres végétales.

L'utilisation des fibres végétales est très variée, elles représentent des matériaux avec des performances techniques et mécaniques qui dépassent parfois celles des matériaux traditionnels. Cette utilisation s'est accentuée au cours de la dernière décennie au point d'être insuffisante pour répondre à la demande de plus en plus importante des industriels [19] et [20].

Les fibres naturelles d'origine végétale les plus utilisées dans l'industrie et particulièrement dans le domaine de la construction sont les fibres de coton, de lin, de chanvre, de palmier dattier, de diss, de paille, de sisal, de jute, de kenaf, de coco ou encore d'alfa.

Les fibres naturelles se divisent en deux catégories selon leur origine : les fibres d'origine animale et celles d'origine végétale.

II. 2. 3. 1. Les fibres animales

Les fibres naturelles sont issues d'animaux et se divisent en trois groupes principaux :

- la laine,
- les poils,
- la soie naturelle.

La laine est un matériau constitué de fibres kératiniques provenant d'ovins. C'est l'une des principales fibres utilisée dans le monde. La structure de ses protéines lui confèrent des qualités que les fibres synthétiques ne peuvent égaler, telle qu'une résilience et une élasticité exceptionnelles. Elle est aussi un bon isolant thermique et à un pouvoir absorbant élevé de l'ordre de 16 à 18% [21], Le mouton a été l'un des premiers animaux domestiqués et les étoffes en laine sont probablement parmi les premiers habits à être portés par l'homme.

La Figure I. 1 représente trois fibres animales différentes, de gauche à droite nous avons un cocon de ver de soie, des fibres d'angora et des fibres d'alpaga [14].



Figure I. 1. *Photos de quelques fibres animales in [14]*

II. 2. 3. 2. Les fibres végétales

Les fibres végétales sont extraites des plantes, soit de la tige comme le lin et le chanvre, soit de la feuille comme les fibres de palmier dattier voir même du fruit lui-même comme la noix de coco. Elles font partie de la biomasse. Elles sont caractérisées par une faible densité, un pouvoir d'isolation thermique, des résistances à la traction élevées, et une biodégradabilité qui constitue un avantage majeur pour l'écologie [15]. Leurs principaux composants sont la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les pectines. Leurs proportions déterminent l'ensemble des propriétés de fibres.

La cellulose

La cellulose est le composant principal de la quasi totalité des fibres végétales. Elle représente plus de 50% de la biomasse sur terre. C'est un glucide de formule moléculaire $(C_6H_{10}O_5)_n$, où n représente le degré de polymérisation ; sa valeur peut varier de quelques centaines à quelques dizaines de milliers [14]. Elle est responsable des propriétés de cohésion et de l'aspect hydrophilique des fibres naturelles. Elle est difficilement soluble et n'est fusible qu'à partir de 320°C.

La lignine

La lignine représente le deuxième composant principal après la cellulose dans la biomasse en termes d'abondance en poids sur la surface de la terre. Il participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes [22]. La lignine confère à la plante une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la

décomposition. La lignine stocke aussi des phénoliques toxiques sous forme libre que la plante a neutraliser. Elle joue donc également un rôle de stockage des déchets des plantes. Sa production naturelle est estimée à près d'un milliard de tonnes par an.

L'hémicellulose

L'hémicellulose est le 3^{ème} composant principal après la cellulose et la lignine et constitue près du quart en poids de la biomasse. L'hémicellulose forme la matrice de support des microfibrilles de cellulose. Contrairement à la cellulose, elle est composée de sucres neutres et est très hydrophile, soluble en milieu alcalin et facilement hydrolysable dans les acides [22].

Les pectines

Les pectines sont présentes en quantités moins importantes que la cellulose et la lignine mais restent un élément important dans la biomasse végétale. Elles jouent le rôle d'un ciment entre les cellules des tissus végétaux qui les rendent plus rigides et maintiennent la cohésion entre eux.

Le Tableau I. 1 donne la composition chimique et les proportions en pourcentage des composants principaux des fibres végétales les plus utilisées dans l'industrie in [14], d'après [23] et [24].

Tableau I. 1. *Composition chimique (en % de masse) des fibres végétales les plus utilisées*

Fibres	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Pectine	Cire
Coton	85 - 90	5,7	0,7 – 1,6	0 - 1	0,6
Lin	71	18,6 – 20,6	2.2	2,3	1,7
Chanvre	70 - 74	17,9 – 22,4	3,7 – 5,7	0,9	0,8
Jute	61,1- 71,3	13,6 – 20,4	12 - 13	0,2	0,5
Ramie	68,6 – 76,2	13,1 – 16,7	0,6 – 0,7	1.9	0,3
Sisal	66 - 78	10 - 14	10 - 14	10	2
Coco	32 - 43	0,15 – 0,25	40 - 45	3 - 4	-
Alfa	45	24	24	5	2

II. 2. 3. 3. Propriétés des fibres végétales

Les propriétés physico-chimiques des différentes fibres permettent leur utilisation en substitution des fibres synthétiques dans le textile et le composite selon les caractéristiques à développer dans le matériau.

Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle microfibrillaire. Le pourcentage de cellulose, l'angle microfibrillaire, le diamètre d de la fibre, sa longueur L et le rapport L/d constituent les principales propriétés physiques de ces fibres (Tableau I. 2).

Tableau I. 2. *Propriétés physiques de différentes fibres végétales in [14], d'après [25] et [26].*

Fibres	Angle microfibrillaire (°)	Diamètre (µm)	Longueur (mm)	Rapport L / d
Coton	33	19	35	1842
Lin	10	5 - 76	4 - 77	1687
Chanvre	6.2	10 - 51	5 - 55	960
Jute	8	25 - 200	9 - 70	110
Ramie	7.5	16 - 126	40 - 250	3500
Sisal	20	7 - 47	0.8 - 8	100
Coco	45	12 - 24	0,3 - 1	35
Alfa	33	5 - 95	5 - 50	1964

Leurs propriétés mécaniques en traction, principales caractéristiques des fibres sont données par le tableau I. 3 pour les fibres végétales les plus utilisées [14], [27], [28].

Malgré que les fibres végétales présentent certaines limites à leur utilisation comme, une faible stabilité dimensionnelle, une faible résistance au feu (dégradation à partir de 200°C), une variabilité des propriétés selon l'âge, la région, le climat et même d'une fibre à l'autre appartenant et une dépendance de la récolte (qualité et quantité), elles possèdent plusieurs avantages tels que leur biodégradabilité, leur faible densité, leur renouvelabilité, leurs propriétés mécaniques et d'isolation acoustique, la faible quantité de résidus lors de l'incinération et le faible bilan carbone [27].

Tableau I. 3. Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales

Fibres	Module d'Young E (GPa)	Allongement (%)	Contrainte à la traction σ (MPa)	Densité
Coton	5,5 – 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 – 1,6
Lin	58	3,27	1339	1,53
Chanvre	35	1,6	389	1,07
Jute	26,5	1,5 – 1,8	393 – 773	1,44
Ramie	61,4 - 128	1,2 – 3,8	400 – 938	1,56
Sisal	9 – 21	3 – 7	350 – 700	1,45
Coco	4 – 6	15 - 40	131 – 175	1,15
Alfa	12,7	1,6	75 – 154	1,51

II. 2. 3. 4. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées e 5 catégories selon leur origine (Figure I. 2).

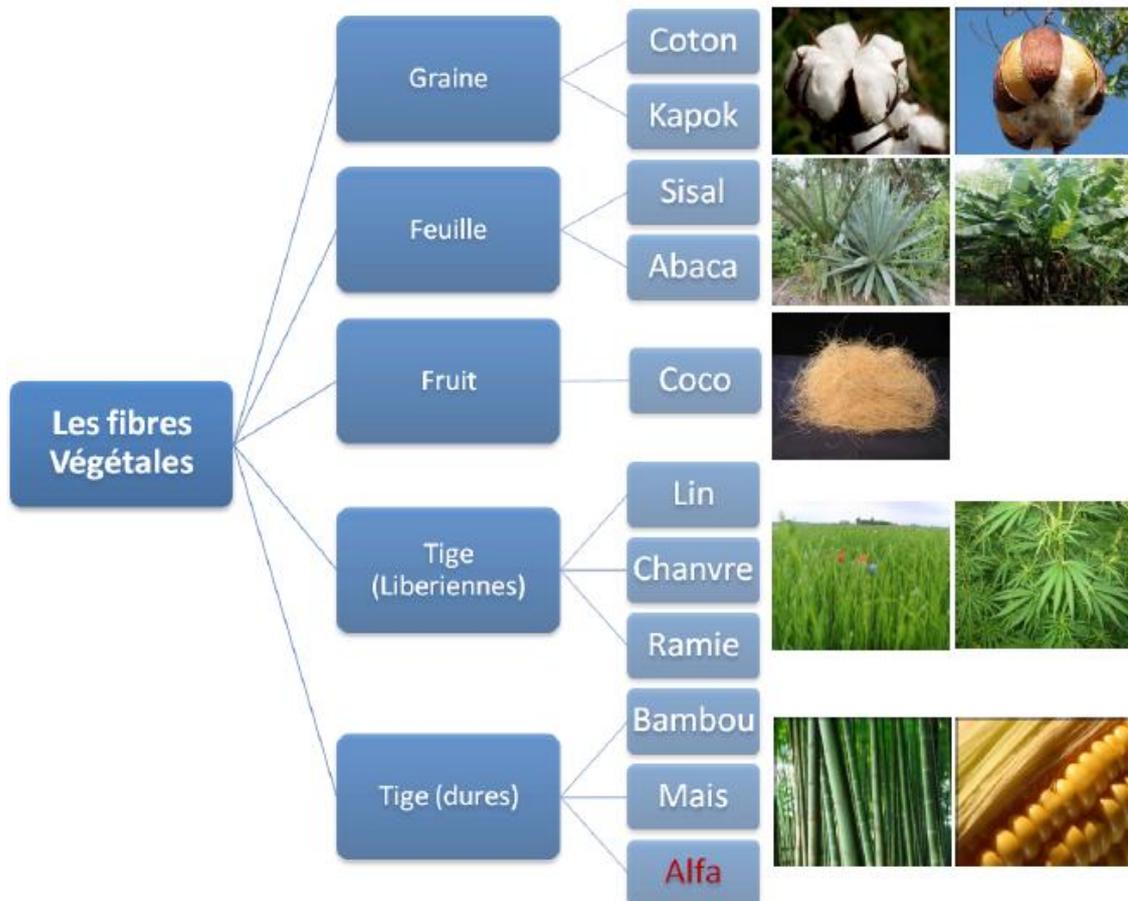


Figure I. 2. Classification des fibres végétales in [14] d'après [15]

II. 2. 4. Les fibres d'alfa

Les réserves forestières étant limitées en Algérie, nous nous sommes tournés plutôt vers l'utilisation des fibres cellulosiques de récupération comme les vieux papiers et cartons recyclés et celles des plantes naturelles endémiques comme le palmier dattier, le diss, l'alfa, ...

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'effet des fibres d'alfa en tant que fibres naturelles d'origine végétale sur les performances mécaniques et la durabilité des bétons de structure.

La fibre d'alfa a été retenue pour des raisons de disponibilité et d'économie. C'est une ressource renouvelable pouvant être intégrée de façon rationnelle dans le domaine de la construction. Pour que le composite soit «écologique» et respectueux de l'environnement, nous avons opté pour l'utilisation de fibre brute, sans aucun traitement chimique préalable.

Le terme "alfa" est une appellation arabe [29] désignant autrefois toutes les graminées steppiques à feuilles résistantes et jonciforme en période de sécheresse. Le mot d'origine latine «spartum», qui a donné «sparto» ou «esparto» [30], est l'appellation employée par les espagnols. Actuellement, une seule plante est appelée alfa, c'est la "Stipa tenacissima L". L'idée de l'utilisation des fibres d'alfa dans la vie courante de l'homme est très ancienne, elle date de l'antiquité [29] pour la fabrication de tapis, de silos de blé, de cordes, de nattes et surtout d'antiquité [30], [31], [32]. Comme renforcement des matériaux de construction traditionnels, elle était utilisée dans la fabrication des briques argileuses ou des plâtres.

II. 2. 4. 1. Répartition géographique de l'alfa

L'alfa est une plante sauvage endémique qui pousse sous forme de touffes dans les régions arides du pourtour méditerranéen. Sa répartition territoriale est donnée par le tableau I. 4.

Les racines de l'alfa emprisonnent les particules du sol et luttent ainsi contre l'érosion et la désertification. La partie aérienne est constituée de tiges portant des gaines emboîtées les unes dans les autres, les épis dépassent ses feuilles pouvant atteindre 120 cm de longueur. Les feuilles et les tiges sont composées de filaments cellulosiques liés par de la lignine, des pectines et de l'hémicellulose.

Elle a une grande importance écologique parce que sa culture nécessite très peu d'eau, pas d'insecticides ni de pesticides. C'est une plante persistante qui ne disparaît pas pendant l'hiver et qui pousse librement, formant de vastes nappes. L'alfa est aussi consommée fraîche pour le bétail.

Tableau I. 4. La répartition territoriale de l'alfa [33]

Pays	Superficie de l'extension de l'alfa (ha)
Algérie	4.000.000
Maroc	3.186.000
Tunisie	600.000
Lybie	350.000
Espagne	300.000
Portugal	Peu

Les espèces du genre *Stipa* se distinguent par leur morphologie et leur anatomie [34], elles poussent dans le sud de l'Europe comme l'Espagne et l'Afrique du nord [35], en Afrique du sud [36] et même en Europe de l'Est [37] comme l'ex-Tchécoslovaquie.

Les steppes algériennes sont situées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud comme le montre la Figure I. 3 [38]. Les régions steppiques constituent un rempart entre les zones côtières et le Sahara, ce qui contribue écologiquement à la limitation de l'avancée du Sahara vers le nord. Elle font partie des zone arides dans le monde (Figure I. 4) tampon entre l'Algérie côtière et l'Algérie saharienne dont elles limitent les influences climatiques négatives sur la première.

Les échantillons d'alfa que nous avons utilisés proviennent de la région de la ville de Djelfa située à 290 km au sud d'Alger.



Figure I. 3. Répartition géographique des steppes algériennes

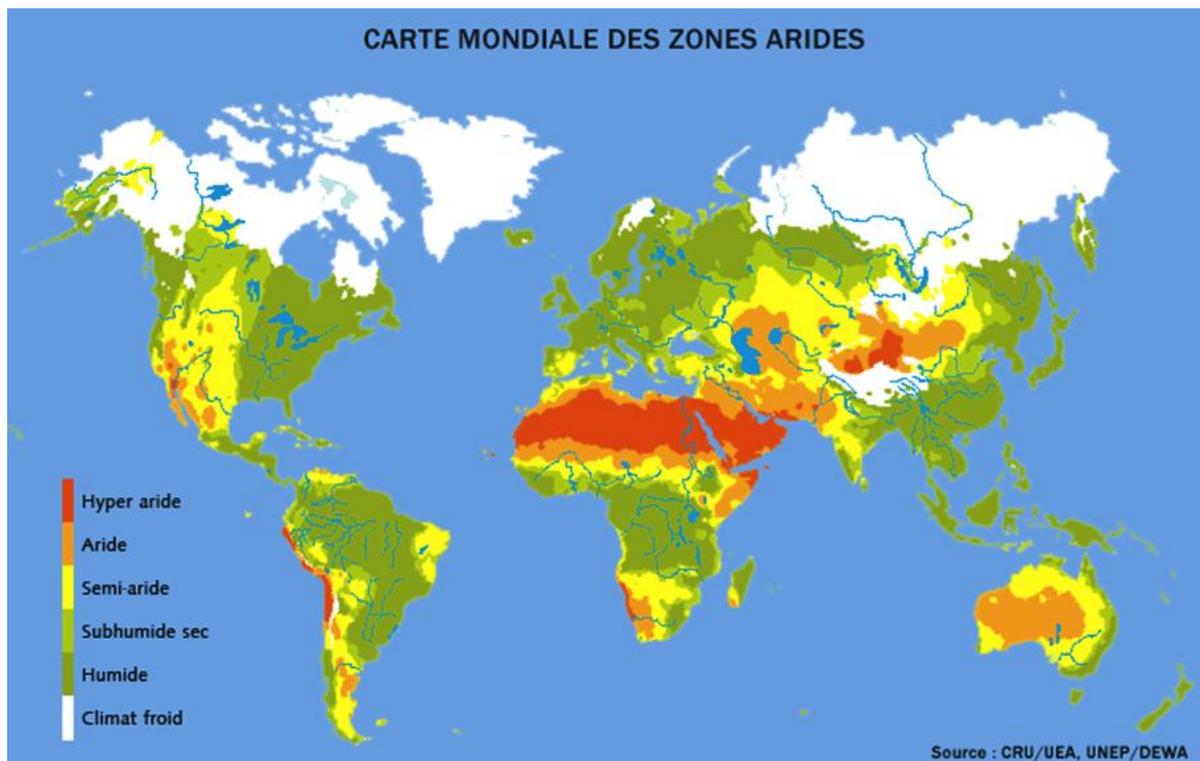


Figure I. 4. Situation géographique de la région steppique en Algérie

II. 2. 4. 2. La morphologie de l'alfa

Vue d'en haut, les tiges poussent en forme d'un cercle ayant pour centre une racine commune, comme le montre la Figure I. 5. Les tiges, qui constituent la partie aérienne de la plante et les

racines qui constituent la partie souterraine de la plante peuvent atteindre une profondeur qui peut aller jusqu'à 1 m, ce qui la maintient bien ancrée dans le sol, et lui permet de tenir et de croître. Entre les deux se trouve le rhizome (Figure I. 6).

L'alfa, grâce à ses racines, stabilise bien le sable et le sol ce qui lui donne la fonction très importante d'arrêter la désertification et d'éviter l'érosion éolienne. Grâce à sa présence, le vent déplace peu le sable. De plus, les tiges ou bien les feuilles proches du sol sont velues et cireuses. Elles limitent la désertification d'une deuxième manière en captant les particules de sable transportées par le vent [38], [39].

Les cires limitent l'évaporation, ce qui confère à l'alfa une résistance à de grands écarts de températures (entre -20°C la nuit et 40°C, en journée) et une faible consommation d'eau [40].



Figure I. 5. *La plante alfa sous formes de touffes circulaires*

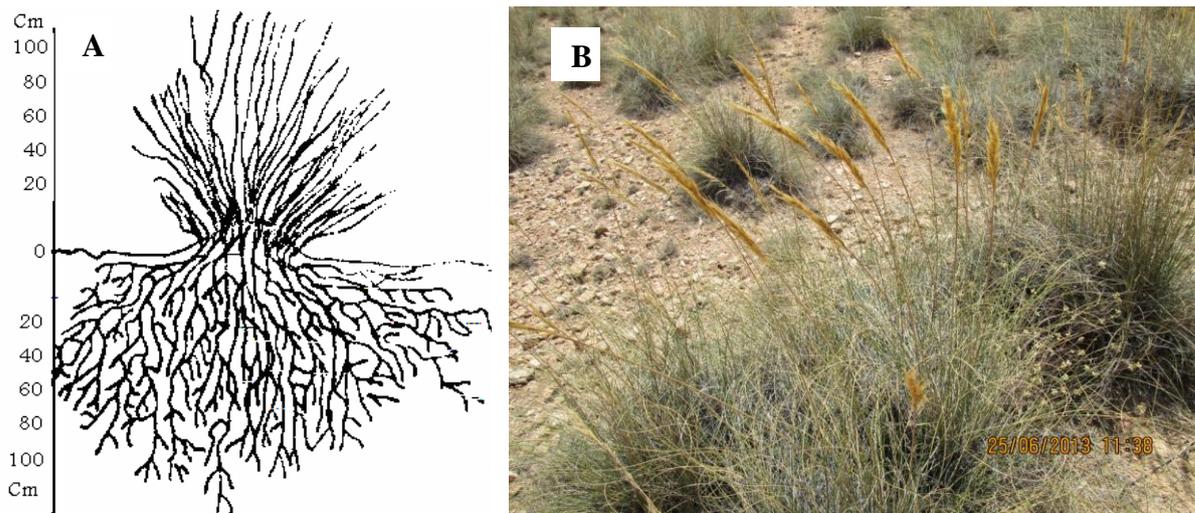


Figure I. 6. Morphologie de la plante alfa, **A.** Montant les racines très développées et la partie aérienne, **B.** Une touffe d'alfa avec feuilles et tiges portant les épis de grains

L'alfa fleurit du début mai à fin juin. Elle est récoltée manuellement de juillet à novembre et parfois sa récolte peut aller jusqu'en février.

II. 2. 4. 3. La structure morphologique de la fibre d'alfa

La structure des fibres d'alfa est hétérogène. Les petites fibres microscopiques collées aux feuilles sont appelées filaments celluloseux ou fibrilles. Elles ont une longueur qui varie de 1 à 5 mm et un diamètre qui varie de 5 à 10 μm . Ces fibrilles sont liées entre elles par l'hémicellulose et forment ainsi des fibres [24]. La composition chimique des fibres d'alfa peut être résumée dans le Tableau I. 1 et les caractéristiques physiques et mécaniques par le tableau I. 2 [14].

I. 2. 4. 4. L'alfa et son environnement

L'abondance et les caractéristiques de l'alfa dans le bassin méditerranéen et plus particulièrement en Afrique du nord ont intéressé l'homme depuis longtemps et l'ont poussé à l'exploiter d'une manière intensive. En effet les feuilles de cette plante présentent un intérêt socio-économique majeur de par la finesse, la résistance et la souplesse de ses fibres. Son exploitation nécessite toujours une main d'œuvre importante, ce qui contribue fortement au maintien de l'emploi de la population locale et empêche ainsi l'exode rural [41], [42] et contribue au maintien de l'écosystème en formant une barrière contre la désertification qui avance à pas de géant dans le nord de l'Afrique.

L'utilité de l'alfa n'est plus à démontrer. Ses divers domaines d'utilisation dans le monde rural, lui ont valu le nom de "graminée sociale" [43]. Elle est utilisée dans plusieurs domaines comme:

- L'artisanat: les feuilles d'alfa sont arrachées à la main par les ouvriers, majoritairement des campagnards de la région. Elles sont destinées à la sparterie, c'est à dire la confection des tapis, des cordages, des tresses pour les couffins, des silos à grains figure I. 7).
- L'industrie: la stipa tenacissima est une plante très riche en cellulose (45%). Les pays alfatiers l'utilisent dans l'industrie du papier de haute qualité [44]. Pendant l'ère coloniale, des lignes ferroviaires spéciales liaient certaines villes comme Djelfa au port d'Alger pour l'acheminement de l'alfa vers la France pour la production du papier de haute qualité.



Figure I. 7. *Utilisation de l'alfa dans l'artisanat*

II. 3. Les bétons de fibres

II. 3. 1. Généralités

D'après la bibliographie [45] et [46], l'utilisation d'une matrice fibrée peut avoir deux buts :

- Effectuer un renforcement principal, comme dans le cas des mortiers. Dans ce cas, le pourcentage de fibres varie entre 5 et 20% du volume total.
- Puis le rôle de renforcement secondaire, comme dans le cas des bétons où le pourcentage de fibres n'excède pas en général, 2% du volume total.

Les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des fibres varient en fonction de leur nature et de leur géométrie.

La distribution des fibres dans un composite est très importante et influe considérablement sur les performances mécaniques et la durabilité des composites. Les fibres peuvent être isolées et dispersées ou groupées sous forme de pelotes, selon le mode de confection et la quantité de fibres utilisée.

Les fibres contribuent à l'amélioration des propriétés du béton et à l'augmentation de la durabilité du matériau et des éléments de construction, comme [47] :

- la diminution de la formation de fissures suite au retrait initial,
- une meilleure stabilité du béton à l'état frais,
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion,
- l'amélioration de la ductilité (sa capacité à se déformer plastiquement sans se rompre),
- l'augmentation de la résistance à l'abrasion,
- la protection contre les éclatements provoqués par le gel,
- une amélioration de la résistance au feu.

Il est nécessaire pour la mise au point de la formulation des bétons fibrés de connaître la technique de mise en œuvre des fibres pour éviter de :

- perturber le malaxage dans le cas où leur dispersion dans le béton n'est pas rapide, elles doivent donc être faciles à incorporer dans le composite.
- avoir un béton non homogène à cause de la mauvaise répartition des fibres et de leur éventuelle agglomération lors du bétonnage.

Aujourd'hui, le renforcement du mortier ou du béton par des fibres constitue une voie nouvelle dans le domaine des matériaux composites. Les "ciment-fibres" et "béton-fibres" sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation,...

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Parfois comme dans le cas des radiers, les fibres peuvent remplacer les treillis soudés.



Selon les caractéristiques présentées par les fibres et les ouvrages auxquels est destiné le béton, la rupture de ce dernier évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile, ce qui constitue un avantage.

Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

Certaines études de recherche [47], [48], [49] et [50] nous ont donné une idée sur les principaux paramètres d'ouvrabilité des bétons fibrés et qui est une caractéristique incontournable des bétons à l'état frais, à savoir, le type et la taille des granulats, le rapport sable sur granulats, le volume rapport volume de fibres sur le volume du béton et la teneur en adjuvants.

L'ajout des fibres dans les bétons améliore leurs résistances à la traction et atténuent leur fragilité. En effet, quand les charges appliquées aux bétons s'approchent de la charge de rupture, les fibres retardent le début de la propagation des fissures, qui parfois est très rapide et les réduisent, une fois qu'elles apparaissent. Elles jouent le rôle des barres d'acier dans le composite mais à petite échelle. Les fibres courtes ont l'avantage de se disperser d'une manière uniforme dans le mélange comparées aux fibres longues [51] et [52].

La présence de micro défauts dans le composite et particulièrement l'existence d'une zone poreuse à l'interface pâte-granulats constitue le point principal qui fragilise le béton traditionnel qui provoque sa fissuration. Cette dernière ne peut être stoppée que par des aciers ou plus récemment par des fibres [53].

II. 3. 2. Les bétons de fibres naturelles

Depuis quelques années, les chercheurs et industriels s'intéressent de très près à la confection de nouveaux composites renforcés de fibres végétales destinés au domaine du bâtiment et du génie civil.

Ces recherches ont pour but l'utilisation et le développement des ressources naturelles et locales tout en intégrant l'aspect socio-économique des pays, surtout dans le contexte actuel, où l'inflation de certains matériaux de construction comme le ciment, l'acier,..., favorise

l'exploitation et l'utilisation des matériaux locaux, en plus de leur impact positif sur l'environnement et sur la vie sociale des habitants.

Plusieurs études sur la morphologie des fibres naturelles [54], comme le sisal [55], le jute, l'alfa [56], le chanvre, le lin [57], l'agave [58], le palmier dattier, le coco..., ont été menées pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques et particulièrement leur résistance à la traction en vue de les incorporer comme fibres de renfort dans plusieurs secteurs comme ceux de l'automobile ou des matériaux de construction. Trois aspects ont été abordés :

II. 3. 2. 1. Environnement

Certaines fibres naturelles possèdent des propriétés mécaniques très intéressantes mais aussi de nombreux atouts environnementaux. Ce sont des ressources naturelles recyclables, biodégradables et faciles à brûler, elles contribuent à minimiser le dégagement du CO₂ dans l'atmosphère et ne demandent pas de beaucoup d'énergie pour leur production [59] [60].

L'industrie du bâtiment et des travaux publics est obligée de nos jours de proposer des matériaux nouveaux qui limitent l'impact de ce secteur sur l'environnement. Elle doit proposer des matériaux selon l'usage visé, en tenant compte des contraintes d'impact environnemental et sanitaire [61]. Substituer certains matériaux dérivés du pétrole par des éco-matériaux d'origine naturelle (plus particulièrement végétale) dans la confection des matériaux de construction. Ces matériaux biosourcés peuvent être utilisés comme isolants pour renforcer le béton [62], le mortier [63], le ciment [64]. La brique, le plâtre [65].

II. 3. 2. 2. Maniabilité

La diminution de la maniabilité est une conséquence directe de l'ajout des fibres végétales à une matrice minérale. Pour pallier à ce problème, on peut ajuster le rapport E/L ou utiliser un superplastifiant [66], [67]. Plus le rapport longueur des fibres sur leur diamètre et l'apport des fibres est important, plus la perte de l'ouvrabilité du mélange est importante [68]. Une augmentation de la quantité d'air entraîné a été remarquée lorsque les fibres sont ajoutées au moment du malaxage. Un retard de prise dû à la présence des fibres est constaté et causé, à priori par la présence de sucres libres et les hémicelluloses contenus dans les fibres végétales [69]. Des mécanismes complexes semblent expliquer ce phénomène et la bibliographie est parfois contradictoire sur ce thème [70], Fisher l'attribue plus précisément à la dégradation de carbohydrates solubles en acides sacchariniques, agents retardateurs de prise [71], [61].

Reading a repris cette interprétation et a considéré que la prise du ciment serait inhibée par des oligosaccharides produits par la dégradation de l'hémicellulose en milieu alcalin [72], [69].

II. 3. 2. 3. Fissuration

Les fibres végétales limitent la propagation des microfissurations qui, avec le temps, entraînent la ruine du béton. A jeune âge, cette limitation de fissuration permet de diminuer le retrait plastique et d'améliorer la ductilité. Les principales caractéristiques qu'elles lui confèrent sont: l'amélioration des résistances à la traction, à la flexion ainsi qu'aux chocs. Ces propriétés dépendent de plusieurs facteurs, comme :

- le type de fibres (chanvre, palmier dattier, alfa, noix de coco, sisal, bagasse, bambou, jute, bois, ...),
- la géométrie des fibres comme la longueur, diamètre, section, morphologie, la rugosité de la surface des fibres,
- le type de ciment,
- la composition du béton,
- la taille des granulats,
- le temps et la vitesse de malaxage, ...[61].

La France est le premier producteur européen de chanvre et sa valorisation de cette plante dans le domaine de la construction s'est particulièrement développée ces dernières années [73], [74]. On trouve le chanvre sous forme de panneaux d'isolation thermique, de cloisons ou de murs internes ou sous forme de laine (qui offre des performances aussi bien en terme d'isolation thermique que d'isolation acoustique) ou encore de fibres pour le renfort des matériaux de construction, notamment les plâtres, les mortiers et les bétons [75], [76].

L'Algérie est le premier producteur d'alfa au monde. Les caractéristiques mécaniques de cette fibre, ainsi que les retombées socio-économiques et environnementales qu'elle pourrait avoir localement nous ont poussé à la choisir comme renfort dans nos bétons en substitution aux fibres de polypropylène dérivées des produits pétroliers.

III. La durabilité des bétons

III. 1. Introduction

La fonction d'un ouvrage est de répondre à un besoin par l'exercice, et la durabilité de l'ouvrage est définie par la conservation dans le temps de cette fonction. L'importance de la fonction d'un ouvrage est proportionnelle à l'importance de la garantie de sa durabilité.

Selon la norme NF X60-500 [77] la durabilité est définie par ; « *l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint* ». L'application de cette norme revient à définir cette limite.

Le résistance à la compression des bétons à 28 jours a été le seul critère de durabilité pris par les constructeurs pendant des dizaines d'années, mais ce terme a été développé et mieux cerné depuis l'avancée des connaissances de la minéralogie et de la microstructure des bétons, des additions minérales et des adjuvants.

La durabilité d'un ouvrage en béton doit le maintenir en état de service pendant une durée de temps minimal et raisonnable qui permettra de le rentabiliser en tant qu'investissement.

Le vieillissement d'un ouvrage est dû non seulement à l'exercice de ses fonctions, mais aussi, à l'action qu'il subit de l'environnement dans lequel il se trouve. L'ouvrage doit donc être conçu pour s'adapter à cet environnement (climat) ainsi que l'agressivité des eaux, des sols, de l'atmosphère et de la température pour que ses caractéristiques mécaniques, physicochimiques et environnementales puissent être optimisées pour durer pendant la période de service souhaitée.

Les ouvrages en béton disposent aujourd'hui d'un support normatif complet, constitué de normes européennes et de référentiels français. Cet ensemble de textes couvre [78]:

- Le dimensionnement des ouvrages en béton,
- Les constituants du béton : la norme NF EN 197-1 pour les ciments, les normes NF EN 12620 et XP P18-545 pour les granulats et la norme NF EN 934-2 pour les adjuvants,



- La durabilité des bétons : la norme NF EN 206-1 qui prend en compte l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage ainsi que les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service.
- Les produits en béton : norme NF EN 13369,
- L'utilisation du béton dans les ouvrages : Fascicule 65A, DTU 21,....

Ces normes se complètent et permettent de mieux comprendre et maîtriser la durabilité des structures en béton [79], [80].

La perméabilité est le paramètre majeur qui régit la durabilité. Cette dernière augmente quand la perméabilité diminue. Pour avoir un béton durable, il est nécessaire de connaître les mécanismes qui conduisent à sa dégradation ainsi que sa résistance aux altérations et aux sollicitations mécaniques et thermiques.

En présence d'agents agressifs minéraux, organiques ou biologiques, le béton subit des dégradations d'ordre chimique ou physique. Les dégradations chimiques sont causées principalement par les acides, les bases et les solutions salines, elles entraînent dans la plupart des cas, la dissolution de la chaux ainsi que la formation de composés nouveaux [81] dont les conséquences sont d'ordre macroscopique comme la chute de résistances et de rigidité, la fissuration et la déformation du matériau.

Les dégradations physiques peuvent être observées en surface (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage), ou internes sous forme de fissures comme dans le cas de changement structural, de gradients d'humidité ou de température, de pression de cristallisation ou d'exposition aux températures externes.

L'action des ions sulfate issus du gypse, utilisé comme retardateur de prise, ne présente pas un danger pour les bétons car l'hydrate formé est certes expansif, mais cristallise dans une pâte de ciment fraîche et plastique qui supporte les déformations induites. Par contre en cas d'attaque externe après la prise, la cristallisation de l'hydrate se fait dans la porosité d'une matrice peu déformable. L'expansion de l'ettringite peut alors donner naissance, sur les parois du réseau poreux, à des pressions de traction causant expansion, fissuration voire éclatement du béton [81] [82].

Parmi phénomènes qui nuisent à la durabilité d'un béton, nous avons :

- La carbonatation / décarbonatation
- La corrosion des armatures métalliques
- La lixiviation
- L'alcali-réaction
- Le gel / dégel
- L'attaque sulfatique
- L'élévation de la température.

Dans notre étude, nous nous intéresserons à la durabilité de nos bétons fibrés face à l'attaque sulfatique externe et à l'élévation de la température. Les résultats pourraient mettre en valeur l'utilisation de la fibre d'alfa non traitée et contribuer à la connaissance du comportement des bétons de fibres végétales comme bétons résistants, écologiques et économiques.

III. 2. L'attaque sulfatique

L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique telle que la modification des propriétés de transport de la porosité, la fissuration, la perte de résistance et la cohésion. Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque qui dépend principalement de la nature, la teneur et la concentration des sulfates au contact ainsi que du type de ciment et du rapport Eau/Ciment utilisé [79].

On distingue deux types d'attaques sulfatiques : l'attaque sulfatique interne [83], [84], qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton (DEF : Formation d'Ettringite Différée), de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies [79].

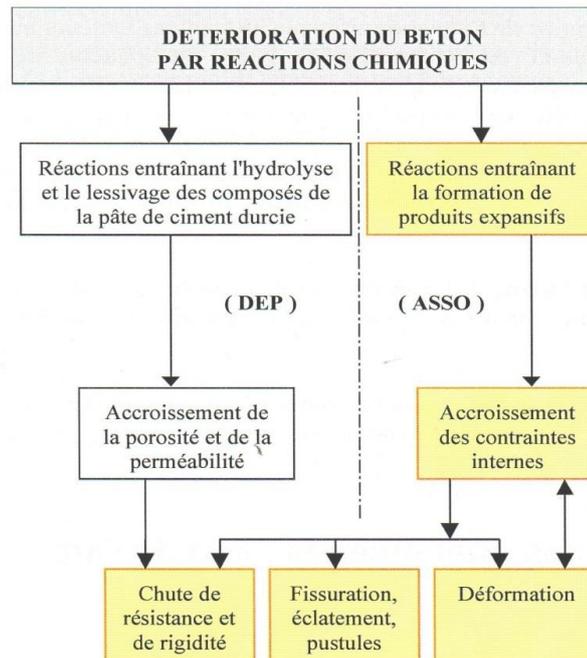


Figure I. 8. Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques (DEP : Dégradation en Eau Pure, ASSO : Attaque au Sulfate de Sodium Na_2SO_4) in [85] d'après [83]. .

Un schéma simplifié (Figure I. 8) des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques a été repris par [85] à partir des travaux de Mehta [83]. Deux réactions y figurent, l'hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durci et les réactions entraînant la formation des produits expansifs (associés à l'Attaque au Sulfate de Sodium : ASSO). Néanmoins, les conséquences macroscopiques sont d'ordre mécanique : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et d'ordre physico-chimique : perte de résistance, modification de la porosité et des propriétés de transport et formation d'un hydrate expansif.

III. 2. 1. L'attaque sulfatique externe

Dès le début du 20^{ème} siècle, de nombreuses attaques par les sulfates présents dans le sous-sol ont été constatées sur les fondations d'ouvrages en béton en milieu marin. Ces dégradations ont été attribuées en partie à la réaction des sulfates avec les hydrates de la matrice cimentaire. Des mesures de protection à l'encontre de cette pathologie ont été prises dès les années 1950, elles recommandaient l'utilisation de béton à faible rapport Eau/Ciment, à taux de C_3A limité

et à ajouts pouzzolaniques. Ces mesures visent à limiter la quantité d'aluminates et à ralentir la diffusion des espèces ioniques agressives depuis le milieu externe vers le milieu interne.

Les sulfates externes, à l'origine de l'altération et la ruine des ouvrages en béton peuvent être présents dans les sous-sols ou provenir de l'industrie (chimique et pétrochimique) suite à une pollution. Les sulfates se trouvent également associés aux alcalins dans les sols (sulfates de sodium, potassium, calcium et magnésium). On trouve aussi, dans le cadre du stockage des déchets radioactifs, des sulfates dans le déchet lui-même, ou dans les eaux de ruissellement ayant traversé des zones naturellement sulfatées (eau séléniteuse, eau d'infiltration, pluies d'acides,...).

L'attaque sulfatique externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, les pluies acides comme l'acide sulfurique, liées à la pollution industrielle atmosphérique, d'où provient l'agent agressif est l'ion sulfate SO_4^{2-} , cause de toutes les phénomènes de dégradation du béton dus à l'attaque sulfatique externe.

Cinq critères majeurs de recherche dans le domaine de l'attaque sulfatique ont été définis comme prioritaires par Cohen [86] :

- Etablir des tests accélérés d'attaques sulfatiques, permettant de tester rapidement la résistance des pâtes de ciment vis-à-vis de certains facteurs reconnus et ce de manière normalisée,
- Etablir une liste d'indicateurs appropriés à mesurer ou à contrôler pendant les essais d'attaque sulfatique,
- Etablir des critères qui permettent d'affirmer de façon claire si le matériau a réussi le test,
- Etablir une méthodologie systématique pour l'analyse des données,
- Etablir une relation entre la durabilité de la pâte de ciment et celle du béton.

Pendant la l'hydratation du ciment, l'aluminate tricalcique C3A, joue un rôle prépondérant en tant que réactif dans la formation de produits expansifs comme le gypse et l'ettringite [87], qui sont à la base de nombreux cas de dégradations [88] observés dans la microstructure des matériaux cimentaires dégradés [89]. Des essais de vieillissement ont été simulés pour mieux connaître ce phénomène de dégradation et de l'appréhender [79], [90].

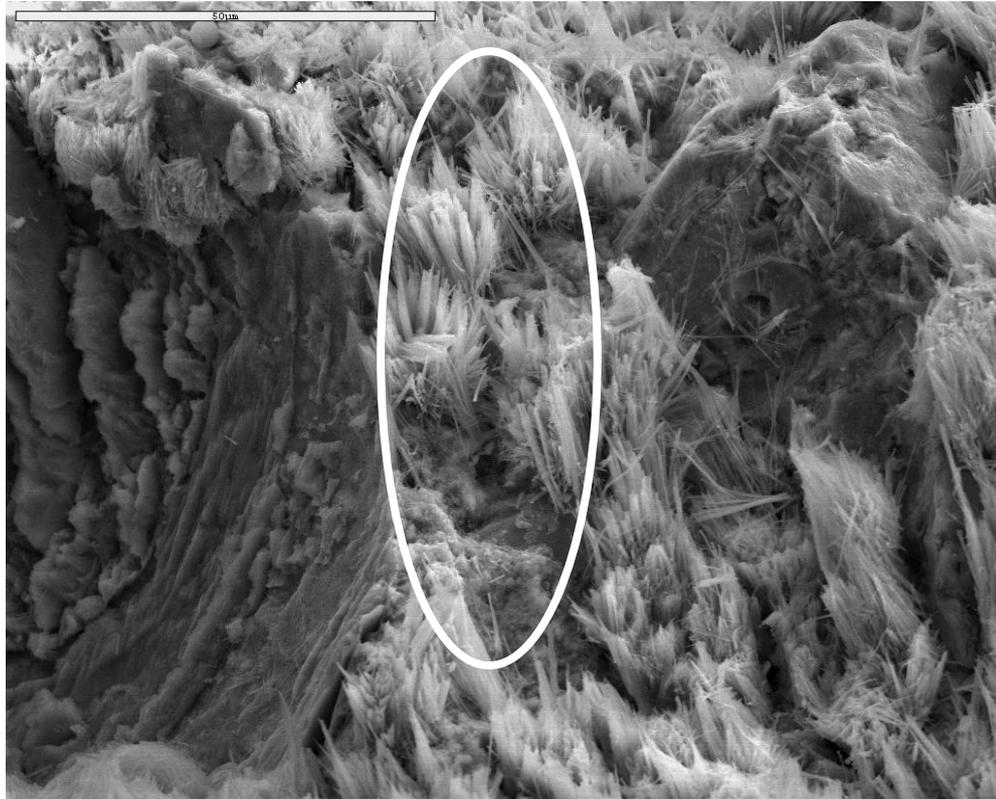


Figure I. 9. Photo au MEB de l'ettringite secondaire sous forme de baguette dans un béton, in [79].

La Figure I. 9 montre la formation de l'ettringite secondaire suite à une attaque sulfatique externe. Ce type d'ettringite la dégradation du matériau cimentaire en entraînant un désordre macroscopique irréversible (gonflement, fissuration, éclatement et ruine du matériau).

III. 2. 2. Identification expérimentale de l'attaque sulfatique externe

Les techniques d'analyses utilisées dans le cadre d'une étude de la durabilité des bétons peuvent être divisées en deux catégories : macroscopiques et microscopiques.

Techniques macroscopiques

- Variation de la masse : un gonflement se traduit par un gain de masse tandis qu'une perte de matière par ruine fait chuter brutalement la masse.
- La mesure de l'allongement (expansion) : c'est le paramètre qui démontre sans équivoque l'existence d'un gonflement. Il n'est mesurable que sur les échantillons équipés de plots, c'est-à-dire les mortiers.

- Mesure de la vitesse de propagation du son : permet d'évaluer de manière non destructive l'évolution des propriétés mécaniques du béton puisque la vitesse est corrélée au module dynamique. Une chute du module dynamique traduit un endommagement global du béton.
- Porosité à l'eau : c'est le premier paramètre qui influe sur les performances mécaniques et la perméabilité des bétons. Cette mesure permet donc d'identifier à priori les bétons les plus durables.
- La mesure de résistances à la compression et à la traction : mesure les propriétés mécaniques des bétons et des mortiers, notamment leur évolution au cours de l'exposition à l'environnement agressif.
- Contrôle visuel de la fissuration : évalue le degré d'endommagement de l'échantillon testé, aide au diagnostic de l'altération [85].

Techniques microscopiques

- La microscopie électronique à balayage (MEB) avec microsonde EDS : identifie les modifications de la microstructure des bétons et des mortiers.. Cet outil permet de réaliser le diagnostic de l'altération.
- Analyse thermogravimétrique (ATG) : mesure la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est exposé à une température dans une atmosphère contrôlée pour déterminer la teneur des différents composants des échantillons.
- La diffraction des rayons X (DRX) : c' est la méthode la plus couramment utilisée pour se renseigner sur la structure cristalline.

III. 3. Comportement des bétons soumis à l'élévation de la température

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, son comportement à l'élévation de température en cas d'incendie intéresse continuellement les chercheurs et les industriels, surtout avec l'apparition de nouveaux adjuvants et de matériaux de renfort, comme les fibres, pour sécuriser le plus possible les ouvrages, la population qui les occupe et leur milieu environnant.

A hautes températures, on remarque une instabilité thermique du béton d'une part et diverses transformations physiques, chimiques et mécaniques lorsqu'il est soumis à traitement thermique d'une autre part.

III. 3. 1. Dégradation thermique des bétons

Depuis l'antiquité, l'homme a été confronté au péril du feu, comme le raconte Homère dans l'Iliade [91] lors de la destruction par un gigantesque incendie de la ville mythique de Troie. Depuis ce temps-là, la liste des villes ou des monuments détruits lors de grands incendies s'est étendue et le souvenir s'en est perpétué au fil des siècles et jusqu'à nos jours.

L'incendie est la source de la dégradation des bétons à hautes températures. Il peut se déclarer suite à des catastrophes naturelles comme les tremblements de terre ou être causé accidentellement dans la plupart des cas par négligence comme c'est le cas de nombreuses catastrophes dues à des fuites de gaz ou de produits chimiques.

Les Figures I. 10 et I. 11 illustrent à titre d'exemple deux incendies récents qui ont marqué le temps. La première concerne un incendie de forêt, considéré comme l'un des pires incendies qu'a connu l'histoire des Etats Unis: c'est celui survenu le 27 juin 2012 au Colorado et la deuxième celui de Tianjin en Chine survenu le 12 août 2015 suite à la double explosion d'un hangar contenant des produits chimiques.



Figure I. 10. *Incendie du Colorado aux USA, le 27 juin 2012 [Onlinetrl.com]*



Figure I. 11. *Incendie de Tianjin en Chine, le 12 août 2015 [Le Journal Le Monde du 21/08/2015]*

Les différentes instabilités thermiques du béton peuvent être classées en six groupes comme suit [92]:

- **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.
- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et

aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de l'hydratation de la chaux créée par la décarbonatation des granulats calcaires entre 700 et 900°C, lors de la phase de refroidissement.

III. 3. 2. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

Le phénomène d'éclatement des bétons soumis à des températures élevées peut s'expliquer par deux processus :

III. 3. 2. 1. Eclatement hydraulique par pression

Ce type d'éclatement [93], [94] est lié à l'augmentation de la pression de l'eau liquide ou en phase vapeur lors du chauffage. La figure I. 12 montre le mécanisme de l'éclatement [95], [96] lié à la vapeur lorsque le béton est soumis à une température élevée. Lors du chauffage, l'eau qui se trouve dans le béton, qu'elle soit sous forme libre ou liée, s'évapore. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et l'autre partie se déplace vers les zones froides à l'intérieur du composite et se condense. L'eau est condensée dans les pores des zones froides et crée une zone de forte saturation, appelée bouchon hydraulique qui ralentit fortement le processus de migration et provoque l'augmentation de pression de gaz chaud du front de saturation. Ces pressions de vapeur ajoutées aux contraintes thermiques provoquent le phénomène d'écaillage et pourraient engendrer l'éclatement du béton.

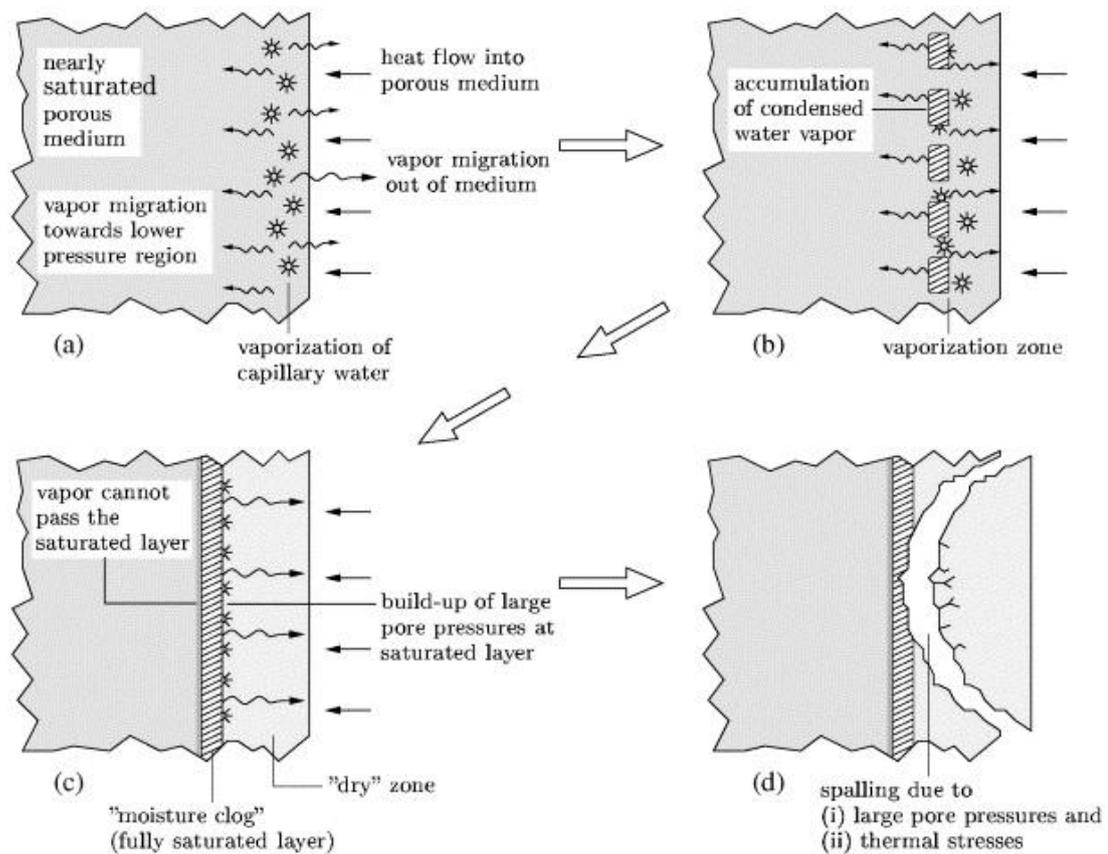


Figure I. 12. Illustration du mécanisme de l'éclatement hydraulique du béton [96]

III. 3. 2. 2. Eclatement lié à la température dans le béton

Il est créé par une dilatation thermique empêchée qui génère des contraintes de compression parallèles à la surface chauffée du béton [97] en en plus de la dilatation des granulats [98]. Ces contraintes de compression lorsqu'elles sont importantes, provoquent l'écaillage du composite [99] par un délaminage parallèle à la surface (Figure I. 13).

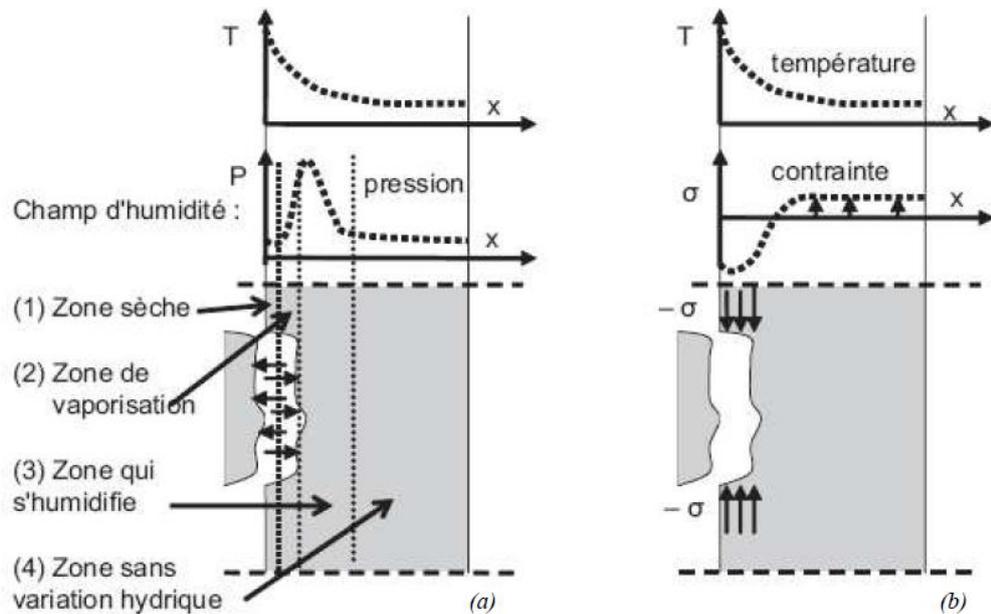


Figure I. 13. Principales hypothèses de l'éclatement du béton :(a) pression interne, (b) dilatation thermique empêchée du béton [93]

III. 3. 3. Les paramètres qui favorisent l'instabilité thermique du béton

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'éclatement du béton sous l'effet de l'élévation de la température :

- **L'eau présente dans le béton** : elle constitue le facteur majeur qui est à l'origine du phénomène d'éclatement, car elle est à l'origine de la formation des pressions internes. Des études ont montré que l'éclatement n'apparaît pas si le matériau est sec [100] et qu'une teneur en eau massique inférieure à 3% limiterait le risque d'éclatement [101]
- **Les propriétés physico-mécaniques du matériau** : Le rôle du rapport eau/ciment, qui, plus il est faible, plus le béton est sensible à l'instabilité thermique, de même pour la densité, la porosité et la perméabilité car, un composite dense, de porosité et de perméabilité réduites, rend difficile le transfert des fluides qui peut provoquer une augmentation des pressions internes lors de la montée de température.
- **Dimensions des éprouvettes** : des études faites sur deux types d'éprouvettes cylindriques, le 11x22 cm et les 16x32 cm ont montré que lors de la montée en température, plus la taille des échantillons est grande, plus le risque d'éclatement est grand [102].

- **La nature des granulats** : les granulats calcaires se dilatent moins que les granulats de silex, ce qui leur confère une meilleure stabilité thermique, d'où l'influence de la nature chimique et minéralogique des granulats lors de la montée de température sur la stabilité thermique du béton [103], [104], [105].
- **La vitesse de chauffage** : Le risque d'instabilité thermique et d'éclatement d'un béton sous l'élévation de la température est proportionnelle à la vitesse du chauffage, plus cette dernière est élevée, plus le risque d'éclatement est important [106].
- **Présence d'un chargement mécanique** : la charge mécanique et particulièrement celle de la précontrainte favorise parfois l'éclatement du béton [107], [108].

III. 3. 4. Transformation microstructurale de la matrice cimentaire

Les principales transformations de la matrice cimentaire sous l'effet de la température ont fait l'objet de plusieurs études [102]. [106]. [109] [110]. [111]. elles sont données par le Tableau I. 5 :

Tableau 1. 5. Principales transformations de la matrice cimentaire sous hautes températures [100]

20°C-120°C	- Evaporation de l'eau libre et une partie de l'eau liée. - Elimination complète de l'eau libre à 120°C. - Décomposition et disparition de l'ettringite avant 100°C.
130°C-170°C	- Décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à la suite d'une double réaction endothermique.
180°C-300°C	- L'eau liée commence chimiquement à s'évaporer du béton
450°C-550°C	- Décomposition de la Portlandite en Chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
600°C-700°C	- Décomposition des phases C-S-H - Formation des silicates bicalciques
700°C-900°C	- Décomposition du carbonate de calcium et libération du gaz carbonique $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.
1300°C-1400°C	- Fusion de la pâte de ciment.

III. 3. 5. Comportement des granulats sous hautes températures

Les granulats constituent le squelette du béton, leur apport est de 60 à 80% de son volume. Généralement, ils sont inertes et dans ce cas, ils ne réagissent pas avec la pâte de ciment, mais peuvent dans certains cas être réactifs et suite à des réactions chimiques, ils présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment. Le choix des granulats est très important pour déterminer le comportement du béton et sa stabilité thermique sous hautes températures [112].

A titre d'exemple, les granulats calcaires sont stables jusqu'à 700°C, température à laquelle 40% de perte de masse est observée, suite à la carbonatation de la calcite CaCO_3 qui se transforme en gaz CO_2 et en chaux libre CaO . Cette dernière peut générer de la portlandite qui fragilise le béton avec l'apparition de fissures et conduit à une baisse des performances mécaniques résiduelles [113], [114].

Un autre exemple, les travaux de Xing et Razafinjato [103], [105] montrent que l'instabilité thermique des granulats de silex est observée entre 150 et 450 °C.

Le choix des granulats est donc primordial dans la confection des bétons soumis à de hautes températures. Ils doivent avoir les propriétés suivantes [115], [95] :

- Un faible coefficient de déformation thermique,
- L'absence de déformations résiduelles après le refroidissement,
- Une bonne stabilité thermique,
- Une composition mono minérale de la roche composant le granulats.

Il est bien évidemment indispensable qu'un béton de structure présente des performances mécaniques et de durabilité optimales. Cependant, dans le contexte actuel, il est également primordial que son impact sur l'environnement soit le plus faible possible, en particulier en terme d'émissions de gaz à effet de serre. Certaines étapes de production des bétons sont incontournables (production du clinker par exemple). D'autres peuvent trouver des solutions de substitution : remplacement des granulats naturels par des granulats de béton recyclé [116], remplacement de fibres de synthèse par des fibres naturelles [117]. L'analyse comparée des impacts environnementaux de ces différentes solutions permet de mettre en évidence celles

qui sont les plus favorables à l'environnement. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode efficace pour déterminer et comparer les impacts environnementaux.

IV. Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Tout produit depuis sa fabrication jusqu'à sa destruction a des impacts sur l'environnement et qu'il est très important de pouvoir quantifier ces impacts afin de les réduire [118]. Pour cela, une méthode a été mise au point selon les normes ISO 14040 et 14044. Cette méthode est appelée : Analyse de Cycle de Vie ou ACV.

IV. 1. Définition de l'ACV

L'ACV est actuellement le moyen le plus fiable pour quantifier les impacts environnementaux d'un produit depuis l'extraction des matières premières qui le composent, jusqu'à sa mise hors service et son élimination en fin de vie, en passant par les phases de sa distribution et de son utilisation. Les impacts couramment retenus et inventoriés (inventaire du cycle de vie : ICV) sont :

- l'effet de serre,
- l'acidification,
- l'épuisement des ressources naturelles,
- l'eutrophisation
- la quantité d'énergie
- la quantité de déchets,...

IV. 2. Objectif de l'ACV

L'objectif principal de l'ACV est de présenter une vision globale des impacts générés par la fabrication d'un produit permettant de trouver des alternatives qui pourraient limiter les pollutions engendrées par sa fabrication. Ce qui constitue un élément de base aux politiques industrielles ou publiques pour l'évaluation des risques environnementaux et la prise de décisions concernant l'aboutissement du projet, comme par exemple le choix de conception et d'amélioration de produits, le choix de procédés, ou encore le choix de filières de valorisation et des critères de labellisation des produits,....

IV. 3. Etapes de l'ACV

L'ACV est basée sur quatre étapes :

- étape 1 : définir les objectifs et le domaine de l'étude
- étape 2 : faire l'inventaire des flux de matières et d'énergies
- étape 3 : évaluer les impacts potentiels à partir des flux de matières et d'énergies recensés
- étape 4 : interpréter les résultats obtenus en fonction des objectifs retenus et en tenant compte des incertitudes et variabilités qui y sont liées. Cette étape est itérative avec les 3 premières de manière à toujours s'assurer que les résultats obtenus permettent de répondre aux objectifs de l'étude. Parfois, la non disponibilité de certaines données puissent conduire, en cours d'étude à restreindre le champ d'étude.

IV. 4. L'ACV et le béton

D'après l'ACV effectuée [119] sur les ciments et leurs, le béton posséderait une qualité essentielle qui est la stabilité chimique et ne dégage aucun gaz ou composé toxique, y compris en cas d'incendie.

Fabriqué à partir de composants naturels respectueux de l'environnement et de notre santé, le béton d'après « Info Ciment » est à l'origine de la considérable amélioration des conditions de logement et de vie. Le béton offre des solutions aux enjeux actuels du Grenelle en matière de réduction de la consommation d'énergie tout en apportant confort, beauté et sérénité [119].

D'après certaines études de recherche [120], c'est, la fabrication du ciment et la phase de cuisson du clinker qui nuit à l'environnement et à la santé des animaux et de l'homme.

En effet, des analyses de poussières et des sols ont été effectuées dans les zones qui entourent des cimenteries. Les résultats obtenus ont montré nettement que ces cimenteries étaient des sources de pollution ayant des effets néfastes sur la santé de la population et sur la végétation de toute la zone avoisinant les cimenteries. Des maladies respiratoires apparaissaient de plus en plus chez les habitants. Concernant les sols, les résultats montrent une forte corrélation entre la quantité de poussières (Figure I. 14) déposées et les proportions des différents constituants du ciment [7]. Le calcaire seul, ne pose pas de réels problèmes pour le sol et la

végétation, c'est la silice et l'alumine qui nuisent considérablement aux sols et conduisent à un flétrissement apparent de la végétation (Figure I. 15).



Figure I. 14. *Dégagement des poussières à la cimenterie de Ain –Touta (Algérie) [7].*

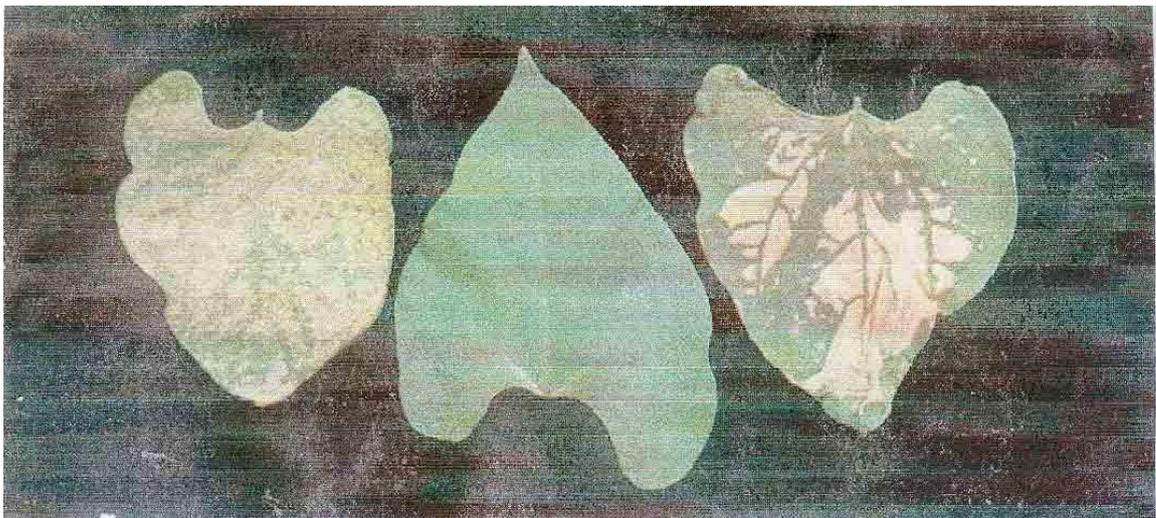


Figure I. 15. *Impact du SO_2 sur l'état des feuilles de haricots verts : à gauche l'impact de l'ozone, au centre une feuille normale et à droite l'impact du SO_2 [120].*

Depuis des années, l'ISO 14000 exige des cimentiers de placer des dépoussiéreurs (filtres) fiables au-dessus des fours de cuisson du clinker, car ces éléments sont indispensables pour diminuer considérablement les rejets de poussières et avoir un environnement plus sain.

V. Références bibliographiques

- [1] Benhamou N., Belas N., Mesbah H., Jauberthie R., Ouali A., Mebrouki A., *Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens*, Canadian Journal of Civil Engineering, 16; pp. 1195-1206, 2009.
- [2] Vu X. H., *Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement: influences du degré de saturation et du rapport eau/ciment*, Thèse de doctorat en Sciences de la terre et de l'Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007.
- [3] Fiches Techniques Tome 2, *Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*, Collection Technique CIMBETON, 2013.
- [4] Baste T., Bouffard M., Horlait C., Lacroix R., Marcellin S., Oliveira T., *Béton et Environnement*, Projet IFIPS S2, Université Paris-Sud 11, 2008.
- [5] Courtial M., De Noirfontaine M. N., Dunstetter F., Mounanga P., Cherkaoui K., Khelidj A., *Microstructure d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable*, XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen (Algérie), 29 au 31 mai 2011,
- [6] Cimbéton., *Histoire du béton naissance et développement : 1818-1970*, Cahier des modules de Conférence pour les écoles d'architecture, CIMBETON, 2009.
- [7] Khelifa R., Rahim N. et M. Al-Mukhtar, *L'impact des cimenteries sur l'environnement-Le cas de la cimenterie d'Ain-Touta (Algérie)*, Annales du bâtiment et des travaux publics, p. 19-24, octobre 2005.
- [8] Berthelot J; M., *Mécanique des Matériaux et Structures des Composites*, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés (ISMANS), Le Mans, Les Clousures, 2013.
- [9] Briemel P. A., *Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts de fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone*, Projet de fin d'étude en génie civil, INSA de Strasbourg, 2013
- [10] Djebali S., *Caractérisation des éléments de structures en bétons de fibres métalliques*, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2013.
- [11] Perret C., Bossard L., *Le Coton*, Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest – Série économie, CEDEAO-CSAO/OCDE, 2006.



- [12] Deguillement D., Dupayage L., Righi N., *Marché et enjeux d'aujourd'hui et de demain pour les agro-ressources*, Journée Agro-ressources & Matériaux Textiles, Institut Français du Textile et de l'Habillement – IFTH, 2009.
- [13] Duhamel S., Garcia, N., *Guide d'éco-conception des produits textiles-habillement*, WWF, France, 2011.
- [14] Dallel M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, Thèse de doctorat dans le génie des procédés, Université de haute Alsace, 2012.
- [15] *Fibres et renforts végétaux Solutions composites*, Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France, 2012.
- [16] Roussel F., *Le chanvre se redécouvre une nouvelle filière d'utilisation dans le domaine des plastiques*, www.Actu-Environnement.com, Mars 2006.
- [17] Bewa H., *Une disponibilité régulée de la ressource, Journée : Fibres de lin et de chanvre : Une solution naturelle pour l'industrie des composites. Solutions opérationnelles et performantes de chimie-verte*, Paris – France, Octobre 2012.
- [18] Monfort-Windels F., *Polymères : bioplastiques oui, ressources alimentaires non*, Le Journal des Ingénieurs N°119, pp.4-9, Mars 2009.
- [19] Boughriet R., *Fibres végétales : de nouvelles applications prometteuses émergentes*, www.Actu-Environnement.com, Octobre 2009.
- [20] *Etude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales*, Note de synthèse, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie- ADEME, Décembre 2005.
- [21] Feughelman M., *Mechanical properties of wool fibers & the two-phase model, Mechanical Properties and Structure of Alpha-Keratin Fibers: Wool, Human and related fibers*, University of New South Wales Press, pp. 28-59, 1997.
- [22] Do T. V. V., *Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non*, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [23] Taj S., Munawar M. A., Khan S., *Natural fiber-reinforced polymer composites*, Proceedings of Pakistan Academy of Sciences, Vol 44(2), 2007.
- [24] Paiva M.C., Ammar I., Campos A.R., Cheikh R.B., Cunha A.M., *Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization*, Composites Science and Technology, 67, pp. 1132-1138, 2007.



- [25] Batra S. K., *Other long vegetable fibers*, In: Handbook of fibre Science and Technology, Ed. M.Lewin and E.M.Pearce, New York. Marcel Dekker, Vol. 4, Fibre Chemistry, pp. 505-575, 1998.
- [26] Mukherjee P. S., Satyanarayana K. G., *Structure and properties of some vegetable fibers. II. Pineapple fibre*, Journal of Materials Science, Vol 21, pp.51-56, 1986.
- [27] Baley C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*, Techniques de l'ingénieur, 2005.
- [28] Ishikawa A., Kuga S., Okano T., *Determination of parameters in mechanical model for cellulose III fibre*, Polymer, Vol 39, issue 10, pp. 1875-1878, 1998.
- [29] Trabut L., *Etude de l'Halfa*, 90 p., Jourdan, Alger, 1889.
- [30] Turrel L. *Le sparte (Stipa tenacissima)*, Bulletin Mensuel de la Société d'Acclimatation, 7, pp. 489-495, 1876.
- [31] Charrier Cdt., *L'alfa des hauts-plateaux de l'Algérie*, Algérie Agricole, 32 p. 1873
- [32] Montessus de Ballore H., *Fibres végétales utilisables en papeterie*, Rev. Tun. 14, pp. 61-67, 1907.
- [33] Portail de l'agriculture marocaine, *L'alfa : Importance écologique et socio-économique*, Terre et Vie, N° 61-62, 2002.
- [34] Mazoyer G., *Morphologie et anatomie foliaire des Stipa de l'Afrique du nord*, Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, 27, P. 284, 1930.
- [35] Maire R., *Flore d'Afrique du Nord, 2, Monocotyledonae, Glumiflorae, Gramineae, sf., Pooideae*, Ed. Lechevalier P., p. 63, Paris, 1953.
- [36] De Winter B., *The South African Stipeae and Aristideae (Gramineae), An anatomical cycological and taxonomie study*, Bothalia, 3, 1965.
- [37] Blanka U., *Contribution to the Ecology of Stypa Species in Central Europ: Distribution of Mineral Elements in Soils and phytomass*, Folia Geobotanica & Phytotaxonomica, Vol. 8, No. 4, pp. 367-376, 1973.
- [38] Nedjraoui D., Bédrani S., *La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte*, Vertigo ; La revue électronique des sciences de l'environnement, V 8, N°1, 2008.
- [39] *Mediterranea, Serie de Estudios Biologicos*, Université d'Alicante, II, N° 22, Espagne, 2011.



- [40] Akchiche O., Messaoud Bouregghda K., *Esparto grass (Stipa Tenacissima L.), raw material of papermaking. First Part*, Chimija rastitel nogo syrja, 4, pp. 25-30, 2007.
- [41] Kirby R. H., *Vegetable Fibres: Botany, Cultivation and Utilization*, Leonard Hill Books, London Interscience ED., 1963.
- [42] Harche M., *Contribution à l'étude de l'alfa (Stipa tenacissima L. d'Algérie): Germination, croissance des feuilles et différenciation des fibres*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et techniques de Lille, 1978.
- [43] Le Houerou H. N., *La végétation de la Tunisie steppique (avec référence aux végétations analogues d'Algérie, de Lybie et du Maroc)*, thèse de doctorat, Institut National de recherche Agronomique de Tunis, 624p., 1969.
- [44] Oudjehih B., *Analyse et physiologie végétales*, Rapport de DEA, U.E.R Physique-Chimie-Biologie, Université de Nancy I, 1984.
- [45] Bentur A. et Mindess S., *Fibres reinforced cementitious composites*, Modern concrete technology series, Elsevier, New-York, 449p, 2007.
- [46] Alcantara M. *Bétons autoplaçants et fibrages hybrides: Composition, rhéologie et comportement mécanique*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2004.
- [47] Dunstan I., *Fibre reinforced cement and concrete: research into practice*, Materials and Structures, Rilem, 20 (2); pp. 147-150; 1987.
- [48] Centre de Recherche de Pont à Mousson, *Les bétons renforcés de fibres de fonte fibraflex*, Pont à Mousson, 2001.
- [49] Rossi I., Harbouche N., Belloc A., *Méthode de composition des bétons de fibres métalliques*, Annales de l'ITBTP, N°475, pp. 37-44, 1989.
- [50] Ellouze A., Ben Ouezdou M., Karray M. A., Beddey A., *Etude des Bétons à Fibres renforcés par des Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux*, Colloque CMEDIMAT, pp. 1-10; 06 et 07 Décembre 2005.
- [51] Bahloul O., *Propriétés mécaniques, physiques et durabilité des mortiers à base de fibres cellulosiques (cas de l'alfa)*, thèse de magistère, Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger, 2006.
- [52] Holmer S., Vahan A., *transition zones studies of vegetable fibre-cement paste composites*, Elsevier, Cement and concrete composites, Vol. 21, pp. 49-57, 1999.



- [53] Bourezam A., Effet des fibres de palmier et d'alfa sur les performances mécaniques des bétons, Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1999.
- [54] Fidelis M. E. A., Pereira T. V. C., Gomes O. F. M., Silva F. A., Filho R. D. T., The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers, *J Mater Res Technol.*, 2(2), pp. 149–157, 2013.
- [55] Bakare I. O., Okieimen F. E., Pavithran C., Abdul Khalil H. P. S., Brahmakumar M., Mechanical and thermal properties of sisal fiber-reinforced rubber seed oil-based polyurethane composites, *Materials and Design*, 31, pp. 4274-4280, 2010.
- [56] Bessadok A., Marais S., Gouanvé F., Colasse L., Zimmerlin I., Roudesli S., Métayer M., Effect of chemical treatments of Alfa (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties ; *Composites Science and technology*, 67, pp. 685-697, 2007.
- [57] Alix S., Philippe E., Bessadok A., Lebrun L., Morvan C., Marais S., Effet of chemical treatments on water sorption and mechanical properties on flax fibres, *Bioresource Technology*, 100, pp. 4742-4749, 2009.
- [58] Bessadok A., Langevin D., Gouanvé F., Chappey C., Roudesli S., Marais S., Study of water sorption on modified Agave fibres, *Carbonate Polymers*, , 76, pp. 74-85, 2009.
- [59] Bindi H., Leveque J, Parisse A., Les fibres composites d'origine naturelle, *Matériaux innovants et procédés associés, les 6^{èmes} Rencontres Technologiques, La Valette –du-Var*, 27 et 28 septembre 2006.
- [60] Keller A., *Matériaux à base de fibres végétales, Etat de la technique et possibilités de développement*, Rapport N° 575 de la Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT), Tänikon, Suisse, 2001.
- [61] Sedan D., *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment – Influence sur les propriétés mécaniques du composite*, Thèse de doctorat, Université de Limoges, novembre 2007.
- [62] Butschi P. Y., *Utilisation du chanvre pour la fabrication d'éléments de construction*, Thèse de Maitrise en Sciences Appliquées, Université de Moncton, Canada, mai 2004.
- [63] Bahloul O., *Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa)*, SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment in Developing Countries, ENSET-Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009.



- [64] Morton J. H., Akers S. A. S., Cooke T., Performance of slash pine fibers in fiber cement products, IIBCC-10th Int Inorganic Bonded Fiber Composite Conference, Sao Paulo (Brazil), November 15-18, 2006.
- [65] Djoudi A., Khenfer M. M., Bali A., Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier, SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment in Developing Countries, ENSET-Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009.
- [66] Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M. M., Chabannet M., Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate, Cement and Concrete Composites, Volume 27, pp. 554-564, 2005.
- [67] Castro J., Naaman A. E., Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers, ACI Materials Journal, Volume 78-6, pp. 69-78, 1981.
- [68] Reported by ACI Committee 544, State-of-the-art report on fibre reinforced concrete, ACI 544.1996.
- [69] Govin A., Aspect physico-chimique de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Université de Saint-Etienne, 2004.
- [70] Magion C., Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [71] Fisher V. F., Wihaus O., Ryssel M., Oldrecht J., The water soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards, Holztechnologie, Volume 1, pp. 1303-1309, 1974.
- [72] Reading T. J., Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces, Concrete International, pp. 57-65, 1985.
- [73] Nguyen T. T., Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Thèse de doctorat, Université de Bretagne, Janvier 2010.
- [74] Tran Le A. D., Maalouf C., Mai T. H., Wurts E., Collet F., Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope, Energy and Buildings, 42, pp. 1797-1806, 2010.
- [75] Le Chanvre dans tous ses états: de la plante au composite, Colloque ENSMA – Poitiers, 18-19 mars 2010.



- [76] Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L., Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“Hempcrete”) manufactured by a projection process, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 2116-2123, 2008.
- [77] Norme NF X60-500, *Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité*, Octobre 1988.
- [78] Rougeau P., Guiraud P., *La durabilité dans le contexte normatif européen*, LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l’Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- [79] Khelifa M. R., *Effet de l’attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l’Université d’Orléans, 2009.
- [80] Capmas A., *Béton et développement durable*, LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l’Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
- [81] Merdia A., Talah A., Kharchi F. et Chaid R., *Contribution à l’étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté*, Colloque International CMEDIMAT2005, Oran, Algérie, les 06 et 07 Décembre 2005.
- [82] Mather B., *Sulphate attack on hydraulic cement concrete*, Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, p12-23, 2000.
- [83] Mehta P. K., *Concrete: structure, properties and materials*, Prentice-Hall, pp. 105-169, Ed, 1986.
- [84] Leklou N., *Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [85] Planel D., Thèse de doctorat en Génie Civil, *Les effets couplés de la précipitation d’espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons*, Université de Marne La vallée, UFR des Sciences et Technologies, le 04 Juin 2002.
- [86] Cohen M. D. et Mather B., *Sulfate attack on concrete – Research needs*, ACI Materials Journal, Vol, 24, N° 1, pp, 177-202, 1991.
- [87] Rosière E., Grondin F., Loukili A., Wenger E., *Etude expérimentale et modélisation des attaques de sulfate dans les matériaux cimentaires*, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Aout 2007.
- [88] Neuville A., *The confused world of sulfate attack on concrete*, Cement and Concrete research, 34, pp. 1275-1296, 2004.

- [89] Irassar E. F., Bonavetti V. L., Gonzalez M., *Microstructural study of sulphate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature*, Cement and Concrete Research, 33, pp. 31-41, 2003.
- [90] Beck K., *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altérations des pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en Sciences des matériaux, Université d'Orléans, Octobre 2006.
- [91] Knox B. W., Well S., *L'Iliade – Poème du XXI^e Siècle*, Editions Arléa, 2006.
- [92] Arupfire, HSE, *Fire resistance of concrete enclosures*, Work Package 1: data collection- Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, London, 2005.
- [93] Pliya P., *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement des bétons soumis à une température élevée*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010.
- [94] Jansson R., Bostrom L., *Fire spalling, The moisture effect*, 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Proceeding, F. Dehn, E.A.B. Koenders pp. 120-129, 2009.
- [95] Nguyen V. T., *Comportement des bétons ordinaires et à haute performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2013.
- [96] Zeim M., Leithner D., Lackner R., Mang H., *How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?*, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 5., Pages 929–942, 2006.
- [97] Bazant Z. P., Kaplan M. F., *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*, Harlow, Ed. Longman, 1996.
- [98] Khoury G. A., *Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle*, Nuclear Engineering and Design, vol. 156, n°1-2, pp. 313-321, 1995.
- [99] Kalifa P., Menneteau F. D., Quenard D., *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*, Cement and Concrete Research, vol. 30, n°12, pp. 1915-1927, 2000.
- [100] Hertz K., *Limits of spalling of fire – exposed concrete*, Fire safety Journal, Vol 38, pp. 103-116, 2003.
- [101] Robert F., Colina H., Debicki G., *La durabilité des bétons face aux incendies*, Paris, Ed. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.

- [102] Kanéma M., *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- [103] Xing Z., *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [104] Mindeguia J. C., *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [105] Razafinjato R. N., *Comportement des bétons à haute température : influence de la nature du granulat*, Thèse de doctorat en génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2015.
- [106] Noumowé A., *Effet des hautes températures sur le béton (20 - 600 °C): Cas particulier du béton à hautes performances*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
- [107] Diedrichs U., Jumppanen U., Pentalla V., *Behaviour of high strength concrete at elevated temperatures*, Espoo 1989, Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, report 92, pp. 7, 1989.
- [108] Jahren P. A., *Fire resistance of high strength / dense concrete with particular reference to the use of condensed silica Fume-A Review*, ACI Structural Journal, 114, pp. 1013-1050, 1989.
- [109] Alarcon-Ruiz L., Platret G., Massieur E., Ehrlacher A., *The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 609-613, 2005.
- [110] Alonson C., Fernandez L., *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*, Journal of Materials Science, 39 (9), pp. 3015-3024, 2004.
- [111] Castellote M., Alonson C., Andrade C., Tirillas X., Campo J., *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating - as studied by neutron diffraction*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1633-1644, 2004.
- [112] Khoury G. A., Anderberg Y., Both K., Fellingner J., Hoj N. P., Majorana C., *Fire design of concrete structures - materials, structures and modeling*, State-of-art report, Fire design of concrete structures, Fib Bulletin N° 38, p. 106, 2007.
- [113] Dias W. P. S., Khoury G. A., et P. J. E. Sullivan P. J. E., *Mechanical Properties of Hardened Cement Paste Exposed to Temperatures up to 700°C (1292°F)*, ACI Materials Journal, vol. 87, N°2, pp. 160-166, 1990.



- [114] Schneider U., Diederichs U., Ehm C., *Effect of temperature on steel and concrete for PCRVs*, Nuclear Engineering and Design, (67) 2, pp. 245-258, 1982.
- [115] Khoury G. A., *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment*, Magazine of Concrete Research, 44 (161), pp. 291-309, 1992.
- [116] Laneyrie C., *Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement à haute température des béton des granulats recyclés*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2014.
- [117] Khelifa M. R., Leklou N., Bellal T., Herbert R. L., Ledesert A. B., *Is alfa a vegetal fiber suitable for making green reinforced structure concrete?*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, pp. 1-22, 2016.
- [118] Boeglin N., Veuillet D., *Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)*, Département Eco-Conception & Consommation Durable / Direction Clients, ADEME, 2005.
- [119] Info Ciment ; *La base documentaire de référence sur les ciments et les bétons*, <http://www.infociments.fr/developpement-durable/construction-durable>
- [120] Khelifa M. R., *Impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie d'Ain-Touta (Algérie)*, Thèse de DEA Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, 2002.



Chapitre II : Elaboration et caractérisation des éco-bétons

Chapitre II : Elaboration et caractérisation des éco-bétons

I. Introduction

I. 1. Etat de l'art

L'utilisation du Béton Renforcé de Fibres (FRC pour Fibre Reinforced Concrete) est en pleine expansion en raison des avantages potentiels tels que: (i) la réduction des fissures au cours du retrait initial, de leur vitesse de propagation et de leur largeur, (ii) l'amélioration de la maniabilité, la ductilité, la résistance à la flexion et la résistance à l'abrasion, (iii) l'augmentation de la capacité de charge de dalles et de résistance au feu. On constate dans la littérature qu'il existe de nombreuses études sur les FRC [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] et [8].

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans la composition des FRC: fibres synthétiques (métalliques [9], organiques telles que les fibres de polypropylène [10]) ou naturelles (minérales [11], végétales [12] et animales [13]). Selon leur nature, elles contribuent à diverses propriétés du composite.

L'utilisation des fibres végétales se développe de plus en plus pour plusieurs raisons qui répondent aux 3 critères du développement durable: (i) économique: par la création et le développement des activités économiques dans les zones reculées; (ii) sociale, par le maintien de l'agriculture dans ces zones, et (iii) environnementale, par la substitution de composants industriels par des composants naturels dans le béton et la réduction des prélèvements en ressources fossiles.

Les fibres végétales sont des produits non conventionnels rentables qui peuvent être utilisés comme matériaux innovants pour produire des constructions vertes et respectueuses de l'environnement dans le domaine de la construction de logements et d'infrastructures dans les zones urbaines et rurales. Ainsi, plusieurs types de fibres végétales ont été étudiés afin d'évaluer leur potentiel en tant que constituant du composite cimentaire [14]. Dans cette étude, nous nous intéresserons à l'utilisation des fibres naturelles végétales que constituent l'alfa qui n'a, jusqu'à présent, pas été étudiée pour l'amélioration des propriétés et des performances mécaniques des bétons. L'alfa est une fibre cellulosique ayant des caractéristiques de rigidité et de résistance à la traction très intéressantes qui pourrait être utilisée comme fibre de renfort dans la confection de béton de structure en substitution à la

fibre de polypropylène. Cette plante a des propriétés mécaniques très intéressantes, mais n'a été étudiée que pour le renforcement des mortiers [15], [16] et [17].

L'alfa (nom scientifique de la plante: *Stippa tenacissima*) est une plante qui appartient à la famille des Poacées (anciennement appelées Graminées). Le genre *Stippa* a une centaine d'espèces qui poussent spontanément dans des sols très pauvres et arides.

L'espèce *tenacissima* pousse en grandes quantités sous forme de touffe de 1 à 1,2 m de hauteur (Figure II. 1) autour du bassin méditerranéen, dans les régions d'Afrique du Nord et le Sud de l'Espagne sous forme de longues feuilles vertes et des tiges avec des graines à leurs extrémités qui lui permettent de se reproduire naturellement. Elle agit principalement comme une barrière contre la désertification de la région du Maghreb [15] et donc joue un rôle très important dans la protection des écosystèmes dans ces régions.

De nos jours, l'alfa est utilisée en premier lieu dans l'industrie papetière et pour la fabrication des cordages. Cette plante ne nécessite ni irrigation ni utilisation de pesticides et insecticides. Elle pousse spontanément, en parfaite harmonie avec son environnement.

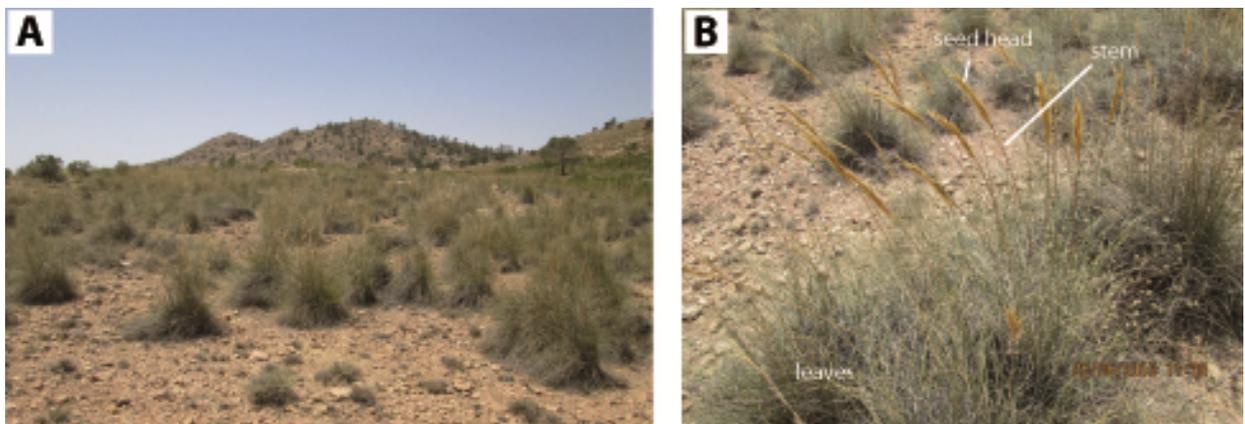


Figure II. 1. *La plante alfa dans son environnement naturel (A) avec ses longues tiges (stems) et les épis de graines (seed heads) et des feuilles (B) sous forme de touffes (leaves)*

En ce qui concerne le développement durable, l'alfa est une plante abondante et renouvelable qui pousse dans les zones arides et rurales. Son exploitation à des fins de construction peut contribuer à créer et développer une activité économique locale, sans impact significatif sur l'environnement et à limiter le phénomène de l'exode rural dans ces régions.

Dans ce chapitre, nous étudierons l'impact des fibres alfa sur les propriétés mécaniques des bétons de structure. Les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres de alfa (Alfa Concrete: AC) sont comparées à celles d'un béton ordinaire (Ordinary Concrete: OC) et d'un béton renforcé de fibres de polypropylène (Concrete Reinforced with Polypropylene: CP) pour évaluer la possibilité de confection d'un béton vert de structure. Différents pourcentages d'Alfa ont été ajoutés au composite pour déterminer la quantité optimale de fibres pour obtenir un béton de structure durable. Les essais de résistances à la compression et la traction par fendage ont été effectués en parallèle avec le suivi des variations du retrait, la perte de masse et du module d'Young.

I. 2. Objectif et description du chapitre

Produire des bétons plus respectueux de l'environnement, en substituant des fibres synthétiques par des fibres à la fois naturelles et respectueuses de l'environnement et aussi plus économiques en matière de prix, est l'objectif principal de ce travail. De nombreuses études ont montré ces dernières années l'avantage de l'utilisation des bio-fibres dans le renforcement des matériaux composites [3], [12], parmi lesquels les mortiers et les bétons [17].

Cette étude vise à valoriser les fibres d'alfa en les utilisant dans la confection de bétons verts destinés à la construction d'éléments de structure avec des propriétés mécaniques appropriées. Dans un premier temps, les matériaux entrant dans la composition du béton d'alfa seront présentés ainsi que la formulation retenue. Les méthodes d'analyse sont ensuite présentées. Enfin, les résultats concernant les caractéristiques et propriétés des bétons à l'état frais puis durci seront présentés et suivis d'une interprétation et d'une conclusion intermédiaire.

II. Matériaux utilisés

II. 1. Matrice

II. 1. 1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un CEM I 52,5 R qui provient de Saint Pierre La Cour (France). Il est fabriqué selon à la norme européenne NF EN 197-1 [18]. Sa densité est de 3140 kg/m^3 et sa finesse Blaine est de $440 \text{ m}^2/\text{kg}$. La composition chimique du ciment est donnée dans le Tableau II. 1 et les principaux pourcentages du clinker selon Bogue sont donnés par le Tableau II. 2.

Tableau II. 1. *Composition chimique du ciment*

Cement	Content (%)
SiO ₂	20.07
Al ₂ O ₃	4.86
Fe ₂ O ₃	3.07
CaO	64.25
MgO	0.95
SO ₃	3.55
K ₂ O	1.00
Na ₂ O	0.20
Equivalent Na ₂ O	0.85

Tableau II. 2. *Pourcentages du clinker*

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
61%	15%	8%	10%

II. 1. 2. Superplastifiant

Le superplastifiant (SP) est à base de polycarboxylate, il est sous forme liquide, a une densité de 1070 kg/m³ (± 20) et une teneur sèche de 20% (± 2). Le superplastifiant a été incorporé dans le mélange lors du malaxage. Sans modifier la consistance, il permet de réduire fortement la teneur en eau du béton et d'augmenter l'ouvrabilité du mélange lors de sa mise en place.

II. 2. Squelette

II. 2. 1. Granulats

Tous les granulats sont d'origine calcaire, ils sont durs et non réactifs à l'alcali-réaction. Ils proviennent de la carrière du Boulonnais. Le sable 0/4 mm a une densité de 2650 kg / m³ et un coefficient d'absorption d'eau de 0,77% (en masse). Les agrégats (12/04 mm et 12/20 mm) ont une densité de 2670 kg / m³ et un coefficient d'absorption d'eau de 0,70% (en masse).

II. 2. 2. Les fibres d'alfa

Les feuilles d'alfa (appelées fibre d'alfa par la suite lorsqu'elles sont coupées en tronçons) que nous avons utilisées proviennent des hauts plateaux de la ville de Djelfa, située à 290 km au sud d'Alger (Figures II. 2).



Figure II. 2. *Emplacement géographique de la ville de Djelfa (Algérie) d'où provient l'alfa*

La teneur en matière organique et la composition chimique de l'alfa sont données dans [15], [17] et [19]. La fibre d'alfa est composée d'environ 30 à 45% de cellulose [17] et [19]. Les fibres d'alfa sont très poreuses en raison de la présence de nombreux poils courts et fins et d'une structure cavernueuse à l'intérieur des feuilles, ainsi que nous avons pu l'observer au Microscope Electronique à Balayage (Figure II. 3). Des informations supplémentaires sur la morphologie de l'alfa sont disponibles dans [20] et [21].

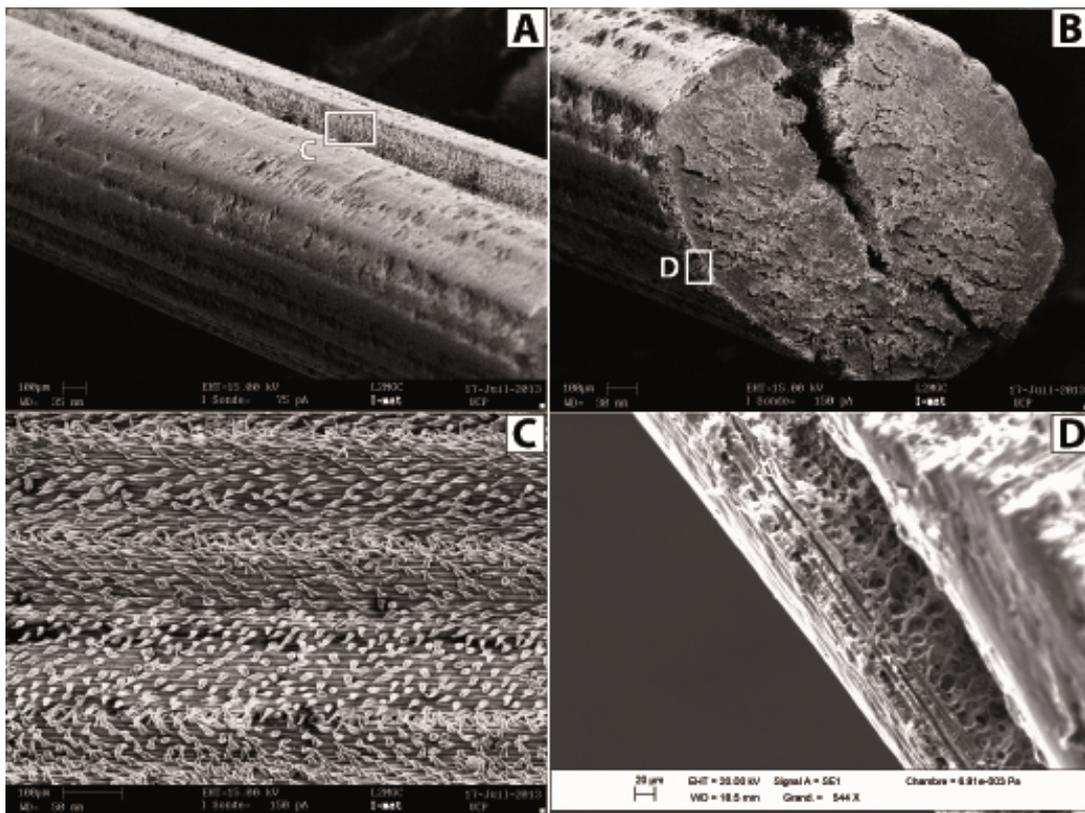


Figure II. 3. Photos de la feuille d'alfa au MEB, où **A**: est la section transversale; **B**: la coupe longitudinale montrant la porosité interne; **C**: un zoom sur la partie interne de la fibre montrant la présence de nombreux poils fins et courts et **D**: un zoom sur la partie externe de la fibre montrant un épiderme mince et poreux.

La porosité de l'alfa est assez importante et son absorption d'eau est estimée d'après la bibliographie à 67% après immersion [19], [22]. Les feuilles d'alfa utilisées ont été coupées en tronçons de longueur similaire à celle des fibres de polypropylène, soit de 2 à 3 cm (Figure II. 4) pour pouvoir les comparer.



Figure II. 4. Feuilles d'alfa découpées en fibres de 2 à 3 cm de longueur

L'alfa non traité a été immergé dans de l'eau pendant 2 heures (Figure II. 5) afin d'éviter l'absorption de l'eau de gâchage par les fibres lors de la confection du béton.



Figure II. 5. Fibre d'alfa immergée dans de l'eau

Cette durée d'immersion a été estimée à partir de la courbe de séchage (Figure II. 6), qui a été obtenue durant le séchage des fibres d'alfa dans un four à 40 ° C pendant 72 heures (jusqu'à la stabilisation de la masse), ce qui correspond à une température ambiante dans la région de Djelfa pendant l'été. Ensuite, les fibres sont immergées dans l'eau jusqu'à saturation, avant d'être séchées à nouveau dans le four à 40 °C. La masse de l'échantillon a été prise en fonction du temps.

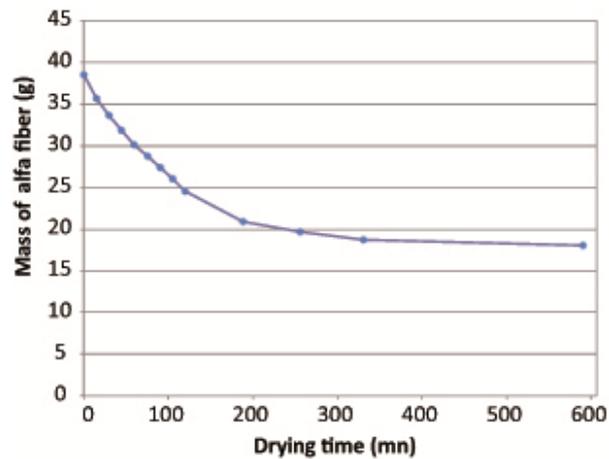


Figure II. 6. *Courbe de séchage de l'alfa à 40°C*

Pour des raisons pratiques sur chantier et une absorption suffisante d'eau par les fibres d'alfa et l'obtention d'un béton ouvrable, nous nous sommes fixés une durée de 2 heures d'immersion. Ainsi, la courbe de séchage nous donne une idée sur l'absorption potentielle d'eau par les fibres d'alfa pendant le temps de gâchage. Selon la Figure II. 6, en 2 heures de temps, l'alfa a absorbé près de 53% d'eau de sa masse totale, soit une valeur proche de celle trouvée dans la bibliographie [19]. Par conséquent l'hydratation des fibres d'alfa avant le gâchage est très importante pour avoir une ouvrabilité équivalente à celle d'un béton de construction et éviter que les fibres d'alfa n'absorbent l'eau de gâchage et ne forment des masses de fibres qui empêcheraient la mise en place du béton.

La résistance à la traction des filaments celluloseux de l'alfa a été testée par Paiva et al. [20] et estimée à 271 ± 104 MPa pour des échantillons de 20 mm et 237 ± 111 MPa pour des échantillons de 40 mm de longueur. La valeur du module des filaments celluloseux de l'alfa [21] est de $19,3 \pm 0,9$ GPa. Nous avons testé des morceaux de feuilles entières d'alfa (20, 40 et 60 mm de long) sans aucun traitement chimique ou physique préalable et nous avons obtenu une valeur maximale de la résistance à la flexion de 165 MPa. La densité des fibres d'alfa sèches est de 630 kg/m^3 [23]. La valeur de la densité des fibres d'alfa humidifiées a été mesurée et est égale à 843 kg/m^3 . Les valeurs trouvées dans la littérature sont de 454 à 890 kg/m^3 selon l'espèce de la plante, la qualité du sol, les conditions climatiques et de la maturité de la plante [19] et [22]. [17] et [22] ont effectué des analyses thermiques des fibres d'alfa pour estimer sa stabilité thermique. Ils ont montré que la perte de masse se produit

principalement à 80 ° C ce qui correspond à la perte d'eau et la décomposition de la cellulose débute à 200 ° C.

II. 2. 3. Les fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène utilisées (Figure II. 7) dans cette étude sont des fibres fabriquées à partir de propylène vierge (fiche technique en annexe 1). Elles sont de marque "EURO320DC".



Figure II. 7. *Fibres de polypropylène utilisées (EURO320DC)*

Ces fibres sont destinées à être incorporées à une matrice de base (béton, mortier ou plâtre) afin de constituer un matériau homogène, et dans le cas des éléments préfabriqués, un démoulage immédiat. Elles se présentent sous la forme de faisceaux maillés de 20 mm de longueurs. Le dosage optimal est de 100 g par sac de ciment de 35 kg, soit 1 kg par m³ de béton dosé à 350kg de ciment. Ce type de fibres permet d'avoir sont d'une efficacité contre la fissuration due aux retraits, un remplacement avantageux des treillis soudés traditionnels ou des fibres métalliques anti-fissuration comme dans les cas des dalles ou des chapes et une simplification du travail et gain de temps appréciable (fiche technique).

Les caractéristiques techniques des Eurofibres sont données dans la fiche technique en annexe 1. La fibre de polypropylène perd sa stabilité à 120°C, elle fond à 165°C et brûle à 320°C.

III. Formulation des différents bétons

Notre objectif est d'obtenir un béton de structure de classe de résistance à la compression C45/55 et de classe d'exposition X0 selon la norme NF EN 206-1. Pour cela sept types de

béton ont été formulés selon la méthode de Dreux-Gorisse, cinq bétons à base de fibres d'alfa (AC: Alfa Concrete) ont été formulés, AC-0.1; AC-1, AC-1,5, AC-2, AC-2,5, contenant respectivement 0,1, 1, 1,5, 2 et 2,5% de fibres de alfa (en volume), un béton à base de fibres de Polypropylène (PC: Polypropylene Concrete) incorporant 0,1% en volume de fibres de polypropylène et un béton ordinaire (OC: Ordinary Concrete) comme béton de référence. Les proportions des mélanges des sept types de bétons confectionnés sont données dans le Tableau II. 3.

Tableau II. 3. Proportions du mélange pour $1m^3$ et valeurs de l'affaissement des différents bétons.

Mix proportions for $1m^3$	Mix code						
	OC	AC-0.1	AC-1	AC-1.5	AC-2	AC-2.5	PC
Cement (kg)	350	350	350	350	350	350	350
Water (l)	168	168	168	168	168	168	168
Sand (kg)	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8
Coarse 4-12 (kg)	432	432	432	432	432	432	432
Coarse 12-20 (kg)	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2
Wet alfa fibers (kg)	0	0.3	8.4	12.7	16.9	21.1	0
Polypropylene fibers (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0
Superplasticizer (g)	280	190	280	280	280	420.8	190
Slump (mm)	130	140	110	60	60	60	120
Standard class NFP 18-451	S3	S3	S3	S2	S2	S2	S3
	Very plastic	Very plastic	Very plastic	Plastic	Plastic	Plastic	Very plastic

Les fibres (alfa et polypropylène) sont des additifs et non pas des composants de substitution à la place du ciment, du sable ou des agrégats. Elles sont considérées comme des fibres de couture et leur apport en masse est négligeable comparé aux pourcentages des autres composants.

Dans le cas des bétons de fibres d'alfa et de polypropylène (AC et PC), les fibres sont mélangées avec le ciment et les granulats avant l'ajout de l'eau pour une meilleure répartition des fibres dans tout le mélange et éviter que les fibres ne s'agglomèrent et n'adhèrent entre

elles. Les images au microscope à balayage (MEB) ont montré que les fibres d'alfa sont uniformément réparties dans le béton jusqu'à un apport inférieur ou égal à 1,5%. Au-delà, des problèmes d'agglomération ou formation de pelotes « d'oursins » peuvent se produire lors de l'introduction des fibres dans le mélange. Les fibres pourraient alors perturber l'arrangement granulaire et ainsi diminuer la maniabilité et la compacité du mélange.

IV. Confection des bétons

Le Tableau II. 4 montre les différents tests effectués sur les bétons ordinaires, aux fibres d'alfa et aux fibres de polypropylène.

Tableau II. 4. *Les différents tests effectués sur les bétons*

Echantillons	OC	AC-0.1	AC-1	AC-1.5	AC-2	AC-2.5	PC	Total
Compression à 28 jours (11 x 22 cm)	3	3	3	3	3	3	3	21
Compression à 112 jours (11 x 22 cm)	3	3	3	3	3	3	3	21
Traction à 28 jours (11 x 22 cm)	3	3	3	3	3	3	3	21
Traction à 112 jours (11 x 22 cm)	3	3	3	3	3	3	3	21
Porosité à 28 jours (11 x 5 cm)	3	3	3	3	3	3	3	21
Module Young à 28 jours (11 x 22 cm)	3	3	3	3	3	3	3	21
Perte de masse de 0 à 80 jours (7 x 7 x 28 cm)	3	0	3	3	0	0	3	12
Retrait de 0 à 80 jours (7 x 7 x 28 cm)	3	0	3	3	0	0	3	12
Total	24	18	24	24	18	18	24	150

Pour chaque formulation de béton, des éprouvettes cylindriques (\varnothing : 11 cm, hauteur: 22 cm) et des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm) ont été confectionnées. Après le malaxage et le

remplissage des moules cylindriques (\varnothing : 11 cm, hauteur: 22 cm) et prismatiques (7x7x28 cm), les échantillons ont été arasés et couverts pendant 24 h au laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de température et une humidité relative supérieure à 90%. Après 24h, les éprouvettes cylindriques ont été démoulées et conservées dans un bac rempli d'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'aux échéances des essais de résistances mécaniques. Pour les éprouvettes prismatiques, après démoulage, elles ont été conservées à l'air libre dans une chambre à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relatives tout le long des tests et jusqu'au jour de l'écrasement.

V. Caractérisation des différents bétons confectionnés

Les essais de caractérisation des bétons à l'état frais et à l'état durci que nous avons effectués sont les suivants :

V. 1. A l'état frais : Ouvrabilité au cône d'Abrams

L'ouvrabilité est une caractéristique majeure que devrait posséder un béton à l'état frais. Elle permet d'obtenir une bonne mise en œuvre du composite. L'ouvrabilité est, en effet, la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise la fluidité du béton, avant que le matériau ne durcisse.

La consistance est une grandeur qui définit l'ouvrabilité des bétons à l'état frais. Elle peut être mesurée par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams, connu aussi sous le nom de "Slump Test" [24]. En mesurant la hauteur d'affaissement après le démoulage du cône, on obtient une indication sur l'ouvrabilité du béton : plus la hauteur d'affaissement est importante, plus le béton est fluide. En ajustant la composition des bétons (principalement par l'emploi d'adjuvants), il est possible de modifier la consistance du béton ainsi que la durée pendant laquelle le béton reste "ouvrable". La formulation d'un béton doit aboutir à un béton qui possède la plus grande ouvrabilité, le plus faible frottement interne avec la quantité d'eau minimum. Cette aptitude du béton à la déformation est aussi traduite par les termes consistance et maniabilité.

Les classes de consistance (classes d'affaissement) permettent de caractériser l'ouvrabilité des bétons et de la classifier selon la norme NF 18-451 (Essai d'affaissement des bétons [22]) à

l'aide du cône d'Abrams. Les classes du béton de fermes à très fluides sont données par le Tableau II. 5.

Tableau II. 5. *Classes d'affaissement des différents types de bétons*

Classe	Affaissement en mm	Type de béton
S1	de 10 à 40	Ferme
S2	de 50 à 90	Plastique
S3	de 100 à 150	Très plastique
S4	de 160 à 210	Fluide
S5	220 ou plus	Très fluide et BAP

Pour la dernière classe, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams n'est pas assez précis, on utilise alors l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

V. 2. A l'état durci

V. 2. 1. Le retrait

Afin de satisfaire à des exigences de plus en plus sévères, la technologie du béton a beaucoup innové ces dernières années et a vu l'apparition de nouveaux types de bétons (bétons à hautes performances, bétons autoplacants, bétons fibrés,...). Si ces bétons présentent en général des résistances mécaniques ou des propriétés physicochimiques supérieures, ils pourraient être plus sensibles au retrait et à la fissuration au jeune âge du fait de leur rapport eau/ciment plus faible et de leur teneur en fines plus élevée.

Le béton très jeune (phase plastique), considéré comme la contraction du béton à l'état frais et le béton jeune (phase de durcissement) sont caractérisés par divers mécanismes de retrait qui résultent, d'une part, de processus se déroulant au sein même du béton et, d'autre part, de l'interaction avec l'environnement (Figure II. 8). Cette diminution de longueur d'un élément de béton est due essentiellement au mouvement d'eau dans la matrice cimentaire. On distingue 4 types de retrait [25] :

- Le retrait chimique, qui est une conséquence directe de l'hydratation du ciment.
- Le retrait plastique est dû à l'évaporation de l'eau via la surface libre du béton frais après sa mise en œuvre. Si le béton est durci ou en phase de durcissement, on parle de retrait de séchage ou de retrait hydraulique.

- Le retrait endogène apparaît surtout avec les bétons présentant un rapport eau/ciment (E/C) faible et une teneur élevée en fines. Dans ces conditions, le ciment prélève de telles quantités d'eau lors de l'hydratation du béton jeune que des pores remplis d'air se forment rapidement. Ce phénomène d'autodessiccation entraîne des pressions capillaires qui conduisent à un retrait rapide dans toute la masse du béton.
- Le retrait thermique est la contraction accompagnant le refroidissement du béton qui fait suite à la réaction d'hydratation exothermique.

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique, car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton. Dans ce contexte, la fissuration au jeune âge favorise le transport d'agents agressifs au sein de l'ouvrage.

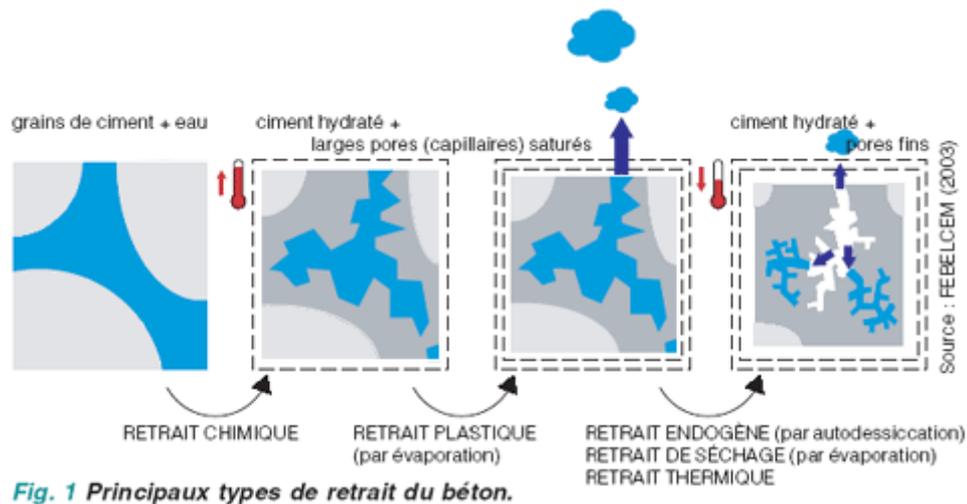


Figure II. 8. Principaux types de retrait du béton

Plusieurs travaux ont conclu que l'ajout des fibres de toutes natures, y compris les fibres végétales est bénéfique pour la réduction du retrait du béton [26], [27], [28] et [29]. Le retrait a été effectué sur les échantillons prismatiques avec un comparateur à cadran étalonné ayant une précision de $\pm 0,001$ mm. Les mesures ont été prises 1 jour après la confection des bétons et jusqu'à 60 jours.

V. 2. 2. La perte de masse

La méthode expérimentale proposée repose sur un suivi de pertes de masse d'éprouvette de béton. L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui s'évapore d'une éprouvette de béton.

Pour chaque béton, les mesures de perte de masse sont effectuées sur des échantillons prismatiques 7x7x28 cm avec des mesures allant de 1 jour après la confection des mélanges jusqu'à 60 jours. La perte de masse $P_m(t)$ est définie par le rapport : $P_m(t) = [m(t) - m_0] / m_0$. Où m_0 est la masse de l'éprouvette après coulage et $m(t)$ est la masse de l'éprouvette à l'instant t . La perte de masse a été mesurée avec une balance avec une précision de $\pm 0,01$ g.

V. 2. 3. Porosité totale à l'eau

La porosité totale (N_{tot}) d'un échantillon de béton est définie comme le rapport du volume des vides (V_{vides}) sur le volume total (V_{total}) de l'échantillon. Cette grandeur est exprimée en pourcentage [30] :

$$N_{tot} = 100 \times \frac{V_{vides}}{V_{total}} = 100 \times \frac{(V_{total} - V_{solide})}{V_{total}} \quad [Eq.1]$$

Elle peut aussi s'exprimer en fonction de la densité apparente sèche ρ_a qui représente la masse des minéraux rapportée au volume total de l'échantillon et de la densité du squelette solide ρ_s qui représente la masse des minéraux rapportée au volume total des grains :

$$N_{tot} = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \quad [Eq.2]$$

$$\rho_a = \frac{M_s}{\rho_{eau} (M_s - M_{hyd})} \quad [Eq.3]$$

Et :

$$\rho_s = \frac{M_s}{\rho_{eau} (M_{sat} - M_{hyd})} \quad [Eq.4]$$

D'où:

$$N_{tot} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{hyd}} \quad [Eq.5]$$

Où :

- M_s représente la masse des éprouvettes séchées à l'étuve à 105°C pendant 24 heures jusqu'à un poids constant.
- M_{hyd} représente la pesée hydrostatique des éprouvettes saturées immergées dans l'eau.
- M_{sat} représente la pesée à l'air des échantillons saturés essuyés avec un chiffon humide

- La densité de l'eau ρ_{eau} étant égale à 1
- Le dispositif de détermination de la porosité totale à l'eau est donné par la Figure II. 9.

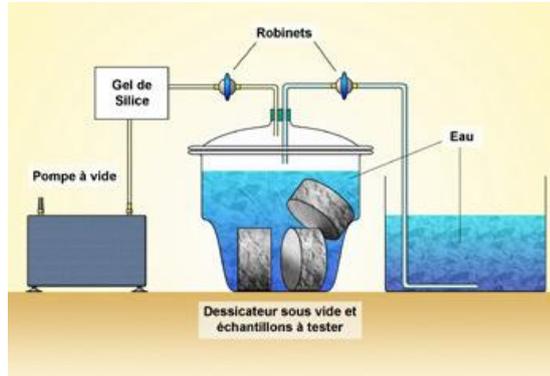


Figure II. 9. *Dispositif utilisé pour la détermination de la porosité totale à l'eau par la méthode de triple pesée*

La porosité a été mesurée sur trois échantillons différents (tranches de 11 cm de diamètre x 5 cm d'épaisseur) pour tous les échantillons cylindriques 11 x 22 cm (Figure II. 9).

V. 2. 4. Propriétés mécaniques (Résistances mécaniques et module de Young)

Les résistances à la compression et à la traction par fendage ont été testées sur les échantillons cylindriques durcis conservés dans une salle humide (100% HR à 20 °C) à 28 et 112 jours. Chaque valeur est la moyenne de trois valeurs. Les tests de compression et de traction ont été effectués selon la norme NF P15-471.

Le module de Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope. Dans notre cas, le module d'Young a été mesuré selon la norme européenne NF P 18-414 [31]. La mesure consiste à déterminer le module d'élasticité dynamique par mesure de la fréquence de résonance fondamentale. Cette fréquence a été déterminée avec une technique d'excitation d'impulsion en utilisant un dispositif Grindosonic®. L'opération consiste à soumettre l'échantillon à un léger choc élastique et à analyser le phénomène de vibration transitoire qui s'ensuit. Ensuite, la fréquence de résonance fondamentale est déterminée électroniquement. Pour chaque béton, on prend la moyenne des modules d'Young obtenus sur trois échantillons confectionnés à partir du même mélange.

V. 2. 5. Observation au microscope électronique à balayage "MEB"

L'observation de la microstructure de nos bétons a été réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB) sur des fragments de béton frais, provenant des échantillons cylindriques après 28 jours de conservation. L'appareil utilisé est un modèle LEICA S340i avec une tension d'accélération de faisceau de 15 KEV à 20 KEV et un courant de sonde de 150 à 250 pA. Avant de les passer au MEB, les échantillons ont été métallisés à l'or après séchage à 40°C.

V. 3. Résultats et discussion

V. 3. 1. Essai d'affaissement ou Slump Test

Les résultats de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams sont présentés dans le Tableau II. 3. Deux classes de béton peuvent être distinguées :

- S3 (110-140 mm; OC, AC-0,1, AC-1 et PC),
- S2 (60 mm; AC-1.5, AC -2 et AC-2.5).

Notons que parmi les bétons de classe S3, le AC-0,1 et le AC-1 se différencient par une diminution de l'ouvrabilité pour les AC-1 à cause de l'augmentation des fibres d'alfa. Les deux types de bétons ont pratiquement les valeurs extrêmes de la classe S3.

Pour les bétons de classe S2, on remarque que plus l'apport en fibres d'alfa augmente, plus l'ouvrabilité et la maniabilité du mélange à l'état frais diminuent, ce qui est cohérent avec les études antérieures [17]. Ceci est dû à la porosité élevée des fibres d'alfa : malgré leur imprégnation dans l'eau avant le gâchage, les fibres d'alfa continuent encore à absorber une partie de l'eau de gâchage lors de la confection du composite, ce qui réduit l'ouvrabilité du béton, d'où l'utilisation du superplastifiant qui a permis de maintenir un niveau d'ouvrabilité similaire aux classes S2 et S3 et d'obtenir un béton de structure facile à mettre en place.

V. 3. 2. Propriétés mécaniques

V. 3. 2. 1. Résistance à la compression simple

Les tests de compression simple ont été effectués sur les échantillons cylindriques 11x22 cm, comme le montre la Figure II. 10.



Figure II. 10. Test de compression simple réalisée sur un béton AC-2.

La Figure II. 11 représente la résistance à la compression des bétons étudiés après 28 et 112 jours de maturation.

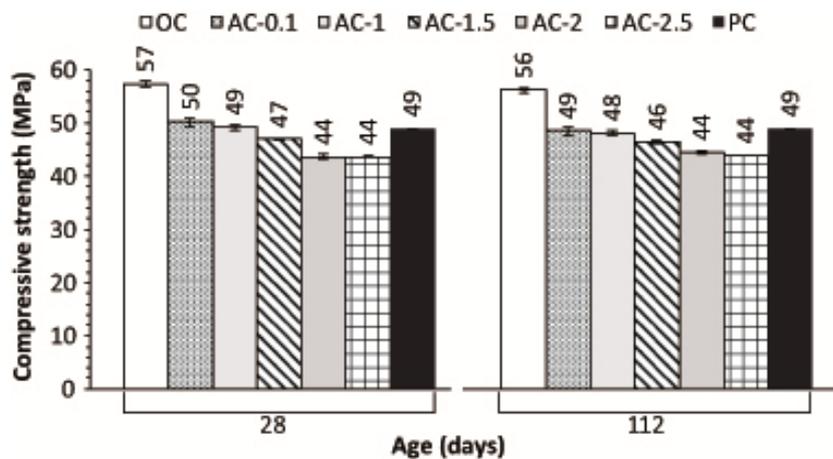


Figure II. 11. Résistance à la compression à 28 et 112 jours des bétons étudiés

Pour les deux échéances, les valeurs de la résistance des différents bétons ont la même tendance et varient entre 44 et 57 MPa. La résistance à la compression la plus élevée est celle des OC et les valeurs les plus basses sont celles des bétons AC-2 et AC-2,5, qui sont pratiquement identiques et égales à 44 MPa. Pour les AC-0,1 et AC-1 les résistances sont identiques à celle du PC et tournent autour de 49 MPa. Il n'y a pas de différence significative entre les résistances à la compression à 28 et à 112 jours, mais bien que celles des AC-1, AC-1.5 et PC diminuent de 14%, comparées à celle de OC, elles restent dans les valeurs de

résistance d'un béton de structure ordinaire dont la résistance est limitée entre 25 et 50 MPa comme le stipule la norme EN 206-1.

On remarque également qu'il y a une forte corrélation entre la teneur en fibres d'alfa et la résistance à la compression pour les deux échéances. Plus la teneur en fibres d'alfa augmente, plus la résistance à la compression du béton diminue. Cette relation est en accord avec plusieurs travaux de recherches, effectués sur les bétons renforcés de fibres végétales. L'utilisation de fibres végétales n'améliore pas la résistance à la compression du béton, car elles augmentent le volume de vides et de réduisent la compacité du composite [17], [26], [32], [33], [34]

V. 3. 2. 2. Résistance à la traction par fendage

Les tests de traction par fendage (essai brésilien) ont été effectués sur les échantillons cylindriques 11x22 cm, comme le montre la Figure II. 12.

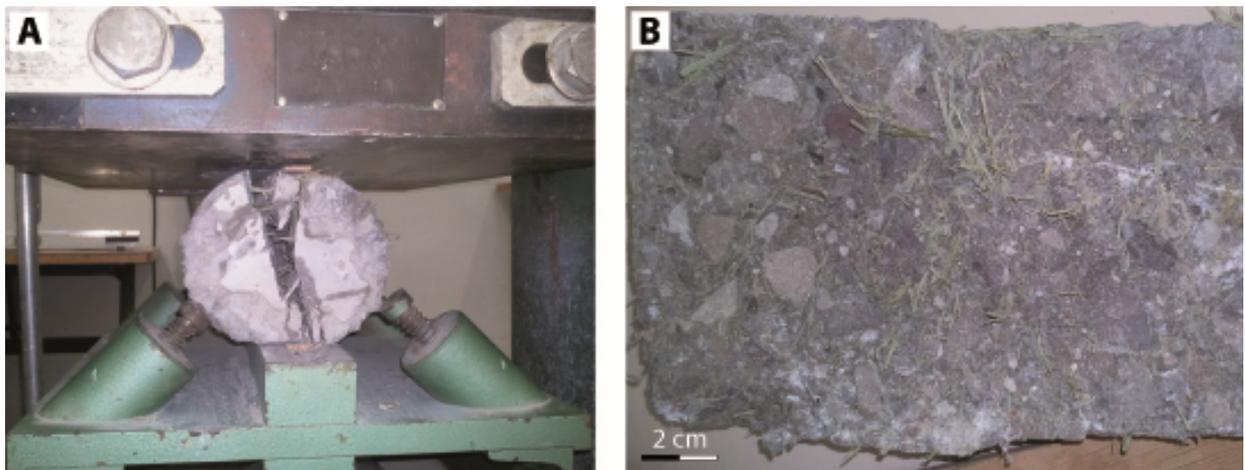


Figure II. 12. *A: Essai brésilien effectuée sur un béton AC-2.5; B: Observation de l'un des deux morceaux du béton AC-2.5 après l'essai brésilien de la figure A*

On remarque sur la photo B de la Figure II. 12 que les fibres d'alfa vertes sont arrachées lors de l'essai brésilien. La résistance à la traction par fendage obtenue par essai brésilien, est représentée sur la Figure II. 13, après 28 et 112 jours de conservation dans l'eau à 20°C.

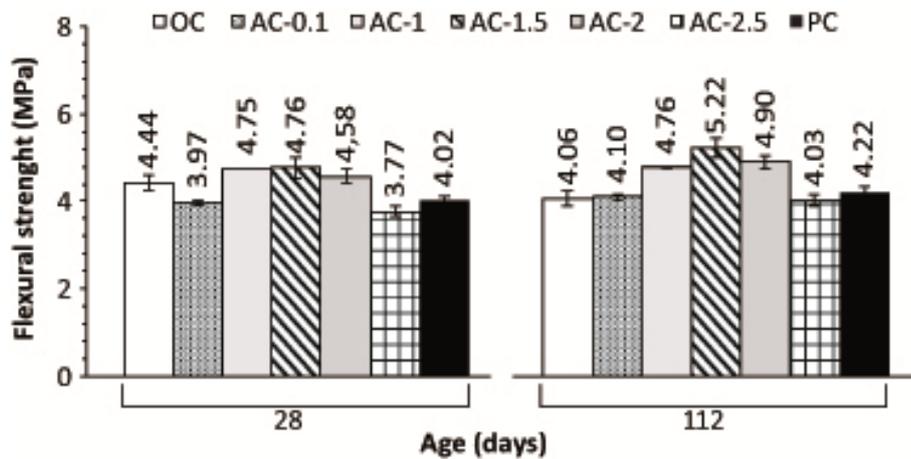


Figure II. 13. Résistance à la traction à 28 et 112 jours des bétons étudiés

On remarque que les résistances des AC-0.1 (3,97 MPa), AC-2.5 (3,77 MPa) et PC (4,02 MPa) sont inférieures à celle du béton de référence OC (4,44 MPa), tandis qu'elles sont plus élevées que celle de OC pour les bétons AC-1 (4,75 MPa), AC -1.5 (4,76 MPa) et AC-2 (4,58 MPa). A 112 jours, tous les bétons renforcés par des fibres présentent de meilleures résistances à la traction comparées à celle de OC (4,06 MPa), à l'exception de AC-2.5 (4,03 MPa), qui reste inférieure à celle du béton de référence. Les meilleures valeurs sont celles des bétons AC-1 (environ 4,75 MPa à 28 et à 112 jours) et AC-1.5 qui ont augmenté de près de 8% à 28 jours (4,76 MPa) et jusqu'à 28% à 112 jours (5,22 MP). Pour les deux échéances (28 et 112 jours), nous remarquons qu'au-delà de 1,5% de fibres d'alfa, les résistances à la traction diminuent. Nous pouvons affirmer que la fibre d'alfa améliore les résistances à la traction des bétons comparées à celles du béton ordinaire (OC) à l'exception des apports 0.1 et 2.5 (AC-0.1 et AC-2,5).

Les fibres d'alfa améliorent la résistance à la traction du béton et réduisent la propagation de fissuration, particulièrement au début de leur apparition. Ce phénomène dépend de la quantité de fibres jusqu'à un certain seuil où l'effet s'inverse comme c'est le cas d'autres types de fibres naturelles [35], [36]. Dans notre cas, le seuil à ne pas dépasser en apport de fibres est de 1,5%. L'amélioration de la résistance à la traction est due à l'effet de couture de la fibre dans la matrice [37], [38], [39]. La capacité des fibres d'alfa à s'étendre vue leur résistance remarquable à la traction retarde la fissuration du béton [32] et empêche sa ruine soudaine comme dans le cas d'un tremblement de terre de faible magnitude.

Mais une fois que le seuil du pourcentage de fibres est dépassé, la résistance à la traction du béton diminue, probablement sous l'effet de la superposition de deux phénomènes potentiels: l'effet de fibres non uniformément dispersées dans la matrice et l'affaiblissement de la matrice cimentaire causé par de la réduction volumique en ciment [17] [28].

Compte tenu des résistances à la compression et à la traction, nous pouvons conclure que les bétons AC-1 et AC-1.5 sont les deux composites ayant les meilleurs apports en fibres d'alfa pour ce qui est des propriétés mécaniques. Ces deux bétons donnent de meilleurs résultats que le PC. Ces pourcentages de fibres sont compatibles avec le travail fait par Bahloul et al [17], qui utilise les fibres d'alfa comme fibres de renfort dans le mortier.

V. 3. 2. 3. Module d'Young

Le module d'élasticité à 28 jours de tous les bétons confectionnés est représenté par la Figure II. 14.

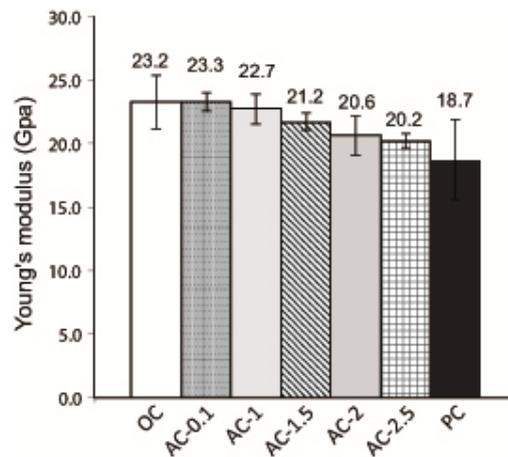


Figure II. 14. *Module d'Young des différents bétons confectionnés à 28 jours.*

On remarque que plus la quantité de fibres augmente, plus le module d'Young diminue sauf pour le AC-0,1 dont le module d'Young est pratiquement égal à celui du OC. La valeur du module d'élasticité la plus faible, est celle du PC. Ces résultats sont cohérents avec la bibliographie [40] qui indique que la variation de module d'Young des composites cimentaires renforcés de fibres cellulosiques ne dépend pas de la longueur des fibres, mais de leur quantité et leur répartition dans le béton.

Comme pour le cas de la résistance à la compression, le module d'élasticité (E) diminue lorsqu'on augmente l'apport des fibres dans le mélange, mais cette diminution reste en général moins importante que celle remarquée pour la résistance à la compression [41], [42] et [43]. Des études [41] ont montré que l'utilisation de 10% de lin dans le composite cimentaire fait chuter sa résistance à la compression de 67 à 77% et son module d'Young à 49% comparé à un béton sans fibres.

Les résultats obtenus mettent en évidence le comportement ductile du béton renforcé de fibres d'alfa. Tous les échantillons de bétons de fibres alfa (AC) ont un module d'élasticité inférieur à celui du béton de référence (OC) sauf pour le AC-0,1, ce qui confirme que le rôle des fibres d'alfa lorsqu'elles sont rajoutées à un béton ordinaire, est de réduire sa rigidité et d'améliorer son comportement ductile comme le montre la Figure II.14. Pour un béton renforcé de 2,5% de fibres d'alfa (AC-2,5), la rigidité est réduite de près de 13% par rapport à celle du béton non fibré.

V. 3. 2. 4. Porosité totale à l'eau

Concernant la porosité totale à l'eau des différents bétons confectionnés, les mesures sont données par la Figure II. 15.

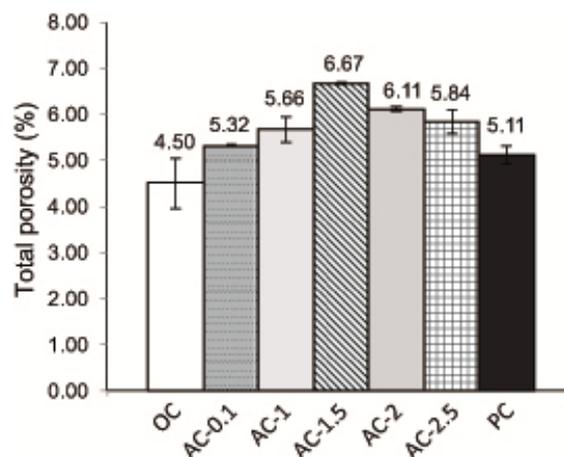


Figure II. 15. Porosité des différents bétons étudiés à 28 jours.

Elle varie entre 4,5 et 6,7%. Le béton ordinaire (OC) est le moins poreux et le béton AC-1.5 le plus poreux. On remarque que la porosité totale à l'eau augmente quand l'apport en fibres d'alfa varie de 0,1 à 1,5% (de AC-0.1 à AC-1.5) et diminue quand l'apport en fibres d'alfa varie entre 1,5 et 2,5% (de AC-1.5 à AC-2.5). Pour le béton de fibres de propylène (PC), la

porosité est proche de celle de AC-0.1. Des études de recherches antérieures [44] et [45] confirment nos résultats quant à l'augmentation de la porosité totale dans le béton renforcé de fibres. Ce sont les fibres dispersées dans le béton qui retiennent une partie de l'eau comme le montre la Figure II. 16.

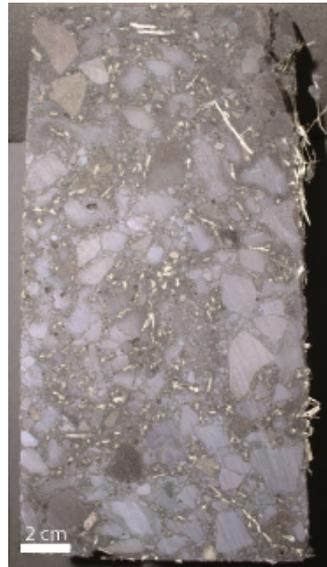


Figure II.16. *Exemple de la distribution des fibres de Alfa pour les éprouvettes de béton cylindriques AC-2.5 (diamètre: 11 cm; hauteur: 22 cm).*

A l'exception des AC-2 et AC-2.5, les valeurs de la porosité totale sont proportionnelles au pourcentage de fibres d'alfa rajouté. Cette exception incohérente avec la littérature peut se traduire par la mauvaise dispersion des fibres d'alfa dans le béton lorsque leur apport est supérieur à 1,5%. Au-delà de cette valeur, des pelotes d'alfa se forme causant des parties hétérogènes dans les échantillons de béton et empêchent l'eau de rentrer dans certaines partie du composite en le rendant moins poreux. Ces résultats inattendus pour les AC-2 et AC-2.5 sont faussés probablement par la concentration des fibres d'alfa dans certaines parties du composite.

V. 3. 2. 5. Retrait total

En tenant compte des résultats précédents et plus particulièrement de la résistance à la traction, qui est la propriété recherchée dans les bétons fibrés, nous avons sélectionné les deux types de bétons fibrés ayant les pourcentages optimaux de fibres d'alfa, à savoir le AC-1 et le AC-1,5 et nous avons gardé les bétons de références, ordinaire OC et de fibres de polypropylène (PC) à des fins de comparaison pour l'étude du retrait de séchage et de la perte

de masse. Les variations des valeurs du retrait de séchage durant près de deux mois sont données par la Figure II. 17.

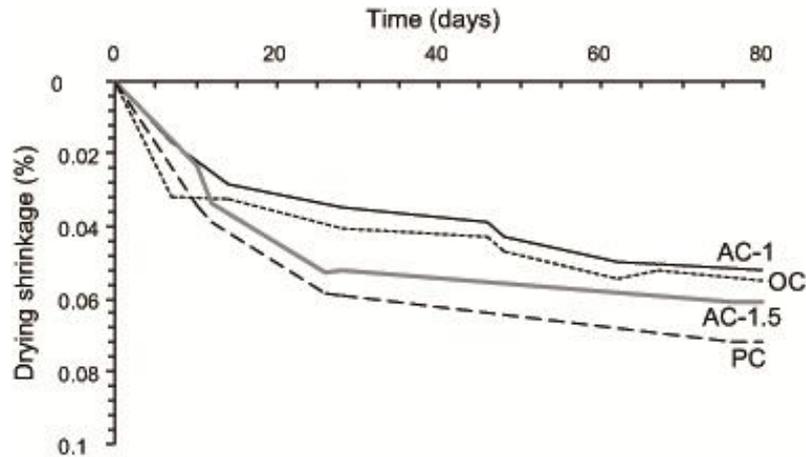


Figure II. 17. Evolution du retrait total des quatre bétons sélectionnés.

On remarque que ces valeurs varient en deux étapes :

- un retrait rapide durant les premiers jours de séchage. La pente de la courbe relative à OC est plus raide que celle des bétons renforcés de fibres (alfa et polypropylène). Parmi les bétons fibrés, le béton au polypropylène PC montre un retrait plus rapide (pente plus raide) que les bétons à l'alfa.
- une évolution lente du retrait pour tous les types de bétons étudiés.

On remarque également que près de 50% du retrait total est atteint au cours de la première étape de l'évolution et après 60 jours de conservation. Le retrait total des quatre bétons sélectionnés varie entre 0,05 et 0,07%. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur pour tous les bétons fibrés et restent proches des valeurs du béton de référence OC (0,05%). Ces résultats sont cohérents avec la littérature qui confirme que le renforcement de béton avec des fibres réduit phénomènes de retrait quelle que soit la nature des fibres, y compris celles d'origines naturelles [32] et [46]. La diminution du retrait de séchage dépend de la nature et de l'apport des fibres, ainsi que de la composition du béton et du type de conservation et de séchage [47].

V. 3. 2. 6. La perte de masse

Les mesures de la perte de masse lors du séchage sont présentées dans la Figure II. 18.

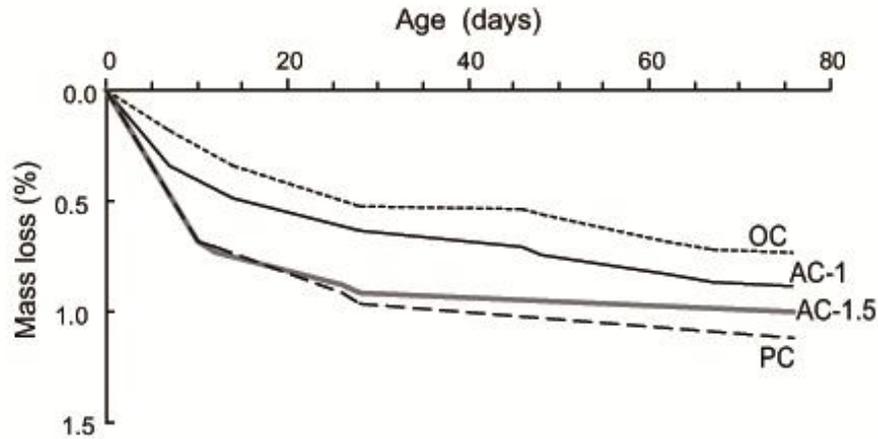


Figure II. 18. Evolution de la masse totale des bétons sélectionnés.

La perte de masse varie entre 0,63 et 1,05% après 60 jours selon le type de béton. Tout comme pour le retrait (Figure II.17), les courbes montrent une évolution en deux étapes:

- la première avec une perte de masse rapide, qui se produit pendant les premiers jours de séchage pendant lesquelles elles enregistrent de 50 à 70% de la perte de masse.
- la deuxième étape de l'évolution, qui est la plus longue, est caractérisée par une perte de masse plus lente quel que soit le type de béton. La perte de masse la plus faible est celle du OC et la plus élevée est celle du PC. La perte de masse du béton renforcé de fibres d'alfa est entre ces deux valeurs.

Pour le béton d'alfa (AC-1 et AC-1.5), la perte de masse est proportionnelle à la quantité de fibres, plus il y a de fibres, plus la perte de masse est importante. Les mesures de la perte de masse permettent d'estimer l'intensité de migration de l'eau. La perte de masse des différents bétons incorporant des fibres (alfa et polypropylène) varie entre 0,6 et 1%. Ainsi, les fibres agissent comme des drains pour la migration de l'eau à l'intérieur du béton et entre le béton et son environnement. On remarque aussi que la perte de masse des bétons d'alfa (AC) est inférieure à celle du béton au polypropylène (PC). Ceci est expliqué par le fait que les fibres d'alfa peuvent retenir l'eau en raison de leur porosité (§II. 2. 2. 2), ce que le polypropylène ne peut pas faire.

Ces importants transferts d'eau sont liés à la porosité du béton et à la quantité initiale d'eau dans les différents mélanges. La porosité importante des bétons fibrés (Figure II. 12) facilite et accélère la diffusion de l'eau et donc la perte de masse de la matière, surtout lorsque les fibres ne retiennent pas l'eau, comme dans le cas du polypropylène.

Les transferts d'humidité causent généralement des variations dimensionnelles des bétons. Ces variations de longueur peuvent générer à jeune âge ou à long terme des fissurations, et donc une perte de durabilité de la structure en béton. Neville [48] a montré que l'utilisation de granulats légers dans les mélanges, implique généralement un retrait plus important, principalement en raison de la faible valeur de leur module d'élasticité [49] et [50]; Par contre dans le cas où les agrégats possèdent des propriétés d'absorption élevées, le retrait total du mélange est élevé [51]. Ces propriétés d'absorption élevées se traduisent par une hausse de la demande d'eau et une augmentation du rapport E/C, conduisant à des déformations importantes dues au retrait de séchage [52].

Le retrait de séchage se produit en raison de la force de traction capillaire induite à la suite de la perte d'eau dans le béton. Dans le cas du rapport E/C pris dans notre étude, le retrait de séchage semble largement prédominant sur le retrait endogène [53], et nous avons pris la précaution d'imprégner les fibres d'alfa avec de l'eau avant de les intégrer au mélange.

En comparant les Figures II. 17 et II. 18, nous remarquons qu'il y a une corrélation entre l'évolution du retrait de séchage et celle de la perte de masse en fonction du temps. Les deux paliers (le premier rapide et le second plus lent) sont similaires pour les deux propriétés. Ainsi, les courbes de retrait peuvent être corrélées à l'évolution de la masse au fil du temps.

Nous pouvons dire que les déformations dues au retrait sont principalement liées aux forces de traction exercées par l'évaporation de l'eau lors du séchage des composites poreux [54], [55]. La tension capillaire interne induit une compression globale du squelette minéral qui conduit au retrait. Les deux étapes de la variation du retrait sont probablement liées à la déformation de fluage sous l'effet retardé de tension capillaire provoquée par le séchage des bétons [56].

L'important retrait des bétons AC-1.5 et PC comparés à l'échantillon de référence peut s'expliquer par une perte plus rapide de l'eau, comme le montre la Figure II. 17. Cette évaporation accrue avec les propriétés d'absorption élevées est associée à un retrait élevé dans le béton [50]. Ces propriétés d'absorption élevées se traduisent par une hausse de demande d'eau et un rapport E/C élevé, conduisant à des déformations importantes dues au retrait de séchage [51]. Par contre le module d'Young est faible pour ces bétons (AC et PC) et peut s'expliquer en partie par les déformations importantes de ces bétons comparées au béton de référence OC comme expliqué précédemment. L'humidification des fibres d'alfa avant le gâchage apporte une eau supplémentaire au mélange le rendant plus poreux lors du séchage (Figure II. 15).

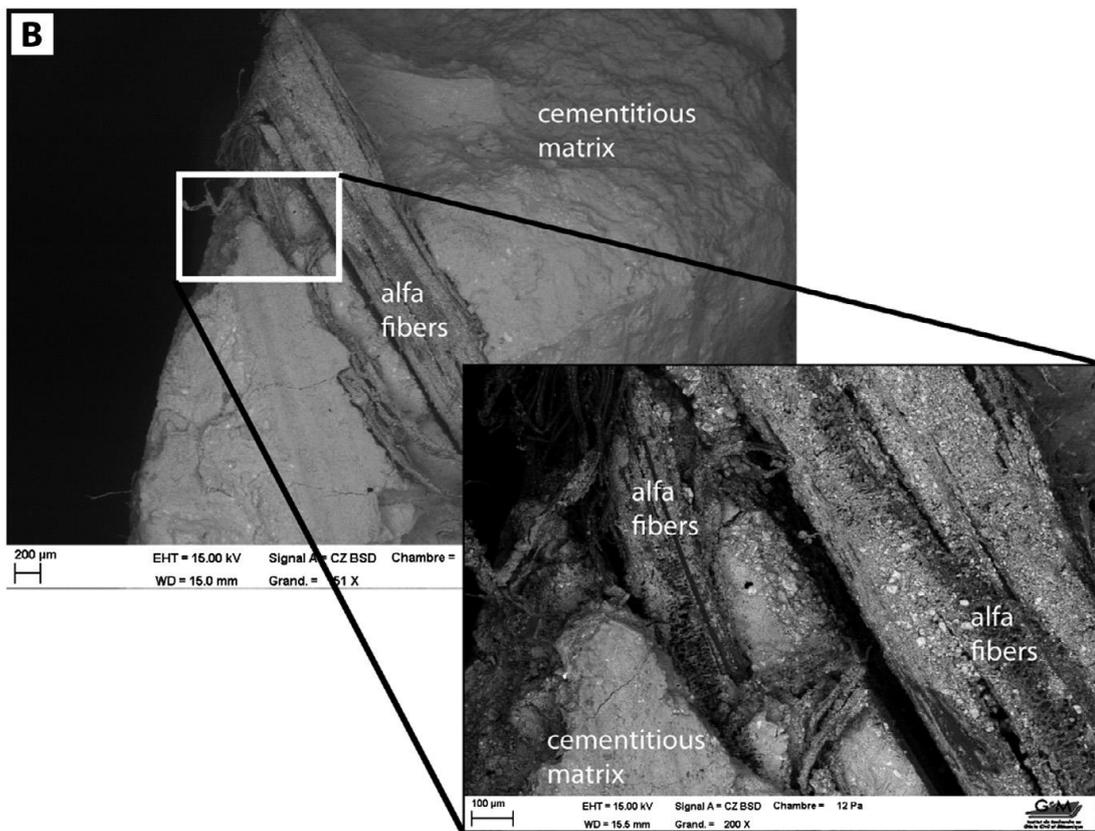
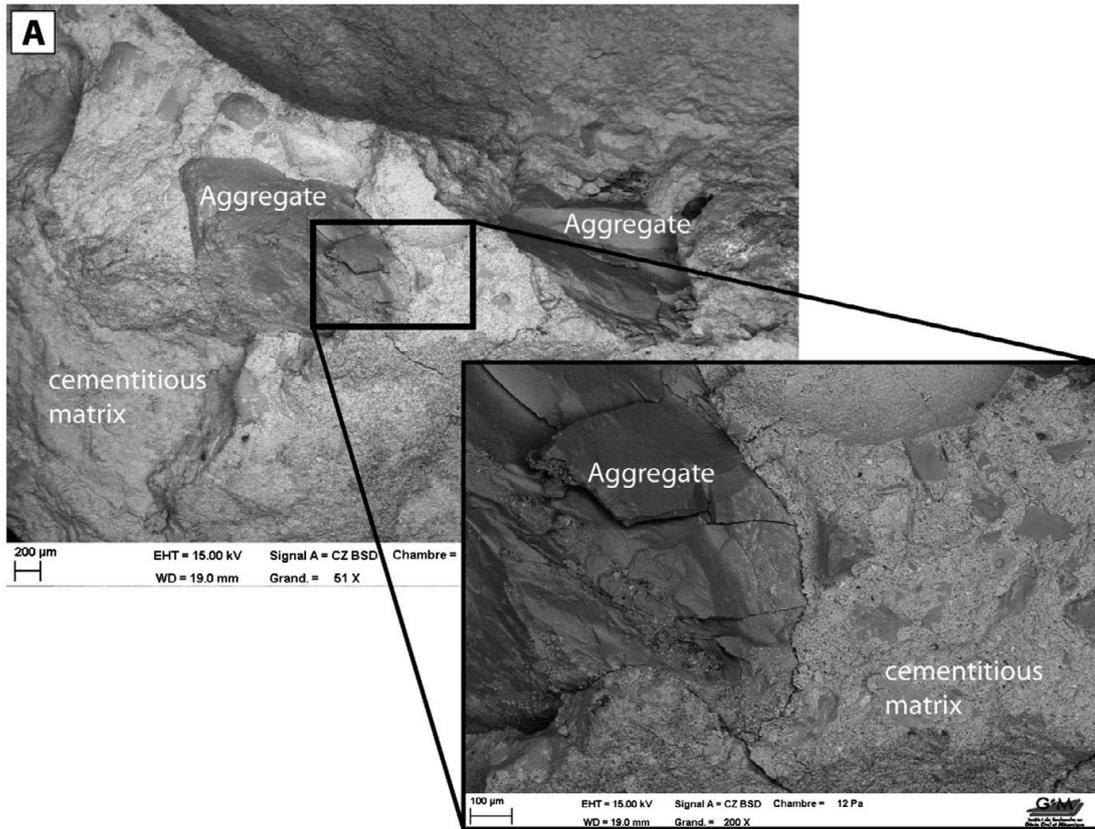
V. 3. 2. 7. Observation au MEB de la microstructure

La microstructure au microscope électronique à balayage d'un béton à l'alfa (AC-1.5), du béton au polypropylène (PC) et du béton de référence (OC) est donnée par la Figure II. 19.

Ces images MEB permettent d'avoir un regard pointu sur la relation entre la matrice et les fibres. Dans les deux cas, nous n'avons pas pu observer une réelle interface, comme cela a été observé à titre d'exemple sur les bétons renforcés de fibres de palmier dattier [57]. Un espace vide est observé tout autour des fibres, qui est plus mince autour des fibres d'alfa que celui qui se trouve autour des fibres de polypropylène, ce qui montre à priori qu'il y a une meilleure adhérence entre la matrice et les fibres pour les béton à l'alfa (AC). Cette différence de la taille de l'espace vide peut être due à :

- la rugosité de surface des fibres,
- la teneur en eau du mélange et des fibres,
- la composition chimique du polypropylène et de l'alfa.

La rugosité de la surface extérieure de l'alfa est plus élevée que celle du polypropylène, ce qui lui confère une meilleure adhérence avec la matrice cimentaire. La teneur en eau de la fibre d'alfa est aussi plus élevée que celle polypropylène (voir paragraphe II. 2. 2. 2. et Figure II. 6), ce qui contribue à limiter le retrait pendant le séchage ainsi que la formation de phases hydratées à l'intérieur de la pâte cimentaire. La composition chimique de l'alfa est très différente de celle du polypropylène, les principaux oxydes présents dans l'alfa étant SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO et K_2O , tandis que C et H sont les seuls constituants du polypropylène.



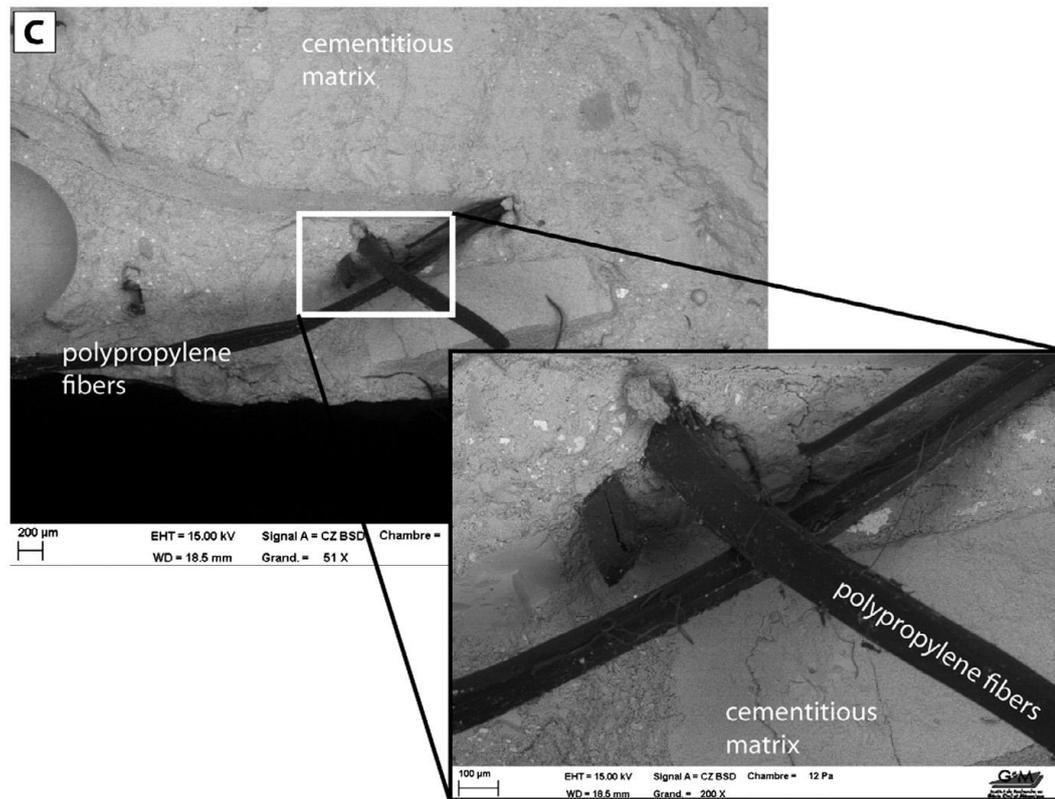


Figure II. 19. Image MEB des bétons OC (A), AC-1.5 (B) et PC (C) montrant la répartition des fibres dans le mélange (BSE ; mode low vacuum ; $\times 51$ – Zoom $\times 200$).

VI. Conclusions

D'après le travail mené dans les conditions considérées, nous pouvons conclure que l'utilisation de fibres d'alfa dans le renforcement du béton pour améliorer ses propriétés modifie certaines caractéristiques du composite :

1. La maniabilité, qui est une caractéristique importante lors du coulage et du coffrage du béton, diminue au-delà du seuil de 1,5% d'alfa dans le mélange.
2. L'incorporation des fibres d'alfa dans la matrice n'améliore en aucun cas la résistance à la compression simple du béton. Au-delà de 1,5%, cette résistance diminue même considérablement à cause de la dispersion hétérogène des fibres pouvant former des pelotes. L'augmentation de la porosité est proportionnelle à la quantité de fibres incorporée dans le mélange, ce qui affecte considérablement sa compacité. Malgré la baisse des résistances à la compression des bétons à 1% et 1,5% d'alfa, elles restent dans la plage des résistances d'un béton de structure.
3. Les fibres d'alfa améliorent la résistance à la traction du béton, qui dépasse celle du béton ordinaire ainsi que celle du béton au polypropylène. Cette propriété pourrait

contribuer à empêcher la propagation rapide de fissures dans le béton et la ruine soudaine des constructions comme dans le cas d'un tremblement de terre de faible magnitude.

4. Le module élastique dynamique varie en fonction de la quantité de fibres incorporée dans le béton. Plus le pourcentage de fibres augmente, plus le module d'élasticité diminue. Les résultats de notre étude montrent que le béton renforcé de fibres d'alfa donne de meilleures valeurs que le béton renforcé de fibres de polypropylène.
5. L'incorporation des fibres dans le béton augmente sa porosité totale à l'eau. Au-delà d'un certain seuil (1,5% de fibres d'alfa dans notre cas), la porosité diminue. Cela peut être dû à la mauvaise dispersion des fibres qui forment des masses et empêchent l'hydratation et l'homogénéisation du mélange. Certaines parties du béton peuvent alors ne pas contenir assez de fibres et deviennent moins poreuse.
6. Le renforcement des bétons par des fibres d'alfa retarde leur retrait de séchage à jeune âge. A long terme, le retrait total de ces bétons (aux fibres d'alfa) est pratiquement similaire à celui d'un béton ordinaire, mais reste inférieur à celui d'un béton renforcé par des fibres de polypropylène.
7. Les bétons renforcés de fibres accusent une perte de masse plus rapide que celle du béton ordinaire (non fibré) et les bétons aux fibres d'alfa enregistrent une perte de masse moins rapide que les bétons au polypropylène. La porosité totale à l'eau dépend essentiellement de la quantité de fibres incorporée dans le béton et de la nature des fibres. Si la perte de masse est importante, elle peut causer des variations dimensionnelles qui peuvent générer des fissures à court et long termes, ce qui peut affecter la durabilité de la structure.
8. Les observations au MEB montrent une bonne adhérence fibres-matrice, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la résistance à la traction.
9. D'après les résultats obtenus, 1% de fibres alfa est l'apport optimal pour le renforcement du béton, ce qui coïncide avec la littérature [17], [57], [58] et [59]. Ces résultats montrent le rôle important que joue les fibres d'alfa; elles retardent les fissurations, surtout au jeune âge et amortissent l'éclatement du béton comparé au béton ordinaire et au béton renforcé de polypropylène.
10. L'utilisation de fibres d'alfa non traitées pour le renforcement des bétons est meilleure que celle des fibres de propylène des points de vue économique et environnemental.

En effet, les fibres d'alfa non traitées sont naturelles, bon marché et ne nuisent pas à l'environnement comparé aux fibres synthétiques (polypropylène) dérivées du pétrole.

11. Il est nécessaire d'humidifier les fibres d'alfa avant le gâchage pour obtenir un béton ouvrable et facile à mettre en place.

En conclusion de cette étude, nous pouvons conclure que la fibre d'alfa peut être utilisée pour le renforcement des bétons, tout comme le polypropylène, mais elle offre en plus la possibilité d'avoir un mélange respectueux de l'environnement qui peut contribuer à la confection de ce qu'on peut appeler des constructions et infrastructures vertes et durables.

VII. Références bibliographiques

- [1] Hannant P. J., *Fibre cements and fibre concretes*, Mineralogical Magazine, 231 P., 1978.
- [2] Bentur A., Mindess S., *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Second Edition. Modern Concrete Technology Series, 2006.
- [3] Li V. C., Wang Y., Backer S., *A micromechanical model of tension softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 39, Issue 5, pp. 607-625, 1991.
- [4] Lange-Kornback D., Karihaloo B. L., *Tension softening of fibre-reinforced cementitious composites*, *Cement Concrete and Composites*, Volume 19, Issue 4, pp. 315-328, 1997.
- [5] Badr A., Ashour A. F., Platten A. K., *Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete*, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 32, Issue 11, pp. 1907-1920, 2006.
- [6] Kakooei S., Akil H. Md., Jamshidi M., Rouhi J., *The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures*, *Construction and Building Materials*, Volume 27, Issue 1, pp. 73-77, 2012.
- [7] Bordelon A. C., Roesler J. R., *Spatial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography*, *Cement and Concrete Composites*, 53, pp. 35-43, 2014.
- [8] Xiao J., Falkner H., *On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures*, *Fire Safety Journal*, 41(2), pp.115-121, 2006.
- [9] Hameed R., Turatsinze A., Duprat F., Sellier A., *Metallic fiber reinforced concrete: Effect of fiber aspect ratio on the flexural properties*, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(5), pp. 67-72, 2009.

- [10] Lura P., Terrassi G. P., *Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers: Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete*, Cement and Concrete Composites, 49, pp. 36-42, 2014.
- [11] Wafa F. F., *Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete*, JKAU: Eng. Sci. Vol. 2, pp. 49-63, 1990.
- [12] Garkhail S. K., Heijenrath R. W. H., Peijs T., *Mechanical Properties of Natural-Fibre-Mat- Reinforced Thermoplastics based on Flax Fibres and Polypropylene*, Applied Composite Materials, Volume 7, Issue 5, pp. 351-372, 2000.
- [13] Charlet K., Baley C., Morvan C., Jernot J. P., Gomina M., Bréard J., *Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 38, Issue 8, pp. 1912-1921, 2007.
- [14] Savastano H., *Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites*, Cement and Concrete Composites, 27 (5), pp. 517, 2005.
- [15] Dallel M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa - (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace University, 2012.
- [16] Benharzallah K., Bouhicha M., Zaidi A., Lakhdari M. F., *Formulation of a repair mortar based on dune sand and natural microfibers*, Conference: Concrete Solutions 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast – UK, 1-3 September 2014.
- [17] Bahloul O., Bourzam A., Bahloul A., *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), 12-14 October 2009.
- [18] NF EN 197-1 Cement - Part 1: *Compositions, specifications and conformity criteria for common Cements*, European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
- [19] Maghchiche A., Haouam A., Immirzi B., *Extraction and characterization of Algerian alfa grass short fibers (Stipa tenacissima)*, Chemistry and Chemical Technology, Vol. 7, N° 3, pp. 339-344, 2013.
- [20] Paiva MC, Ammar I, Campos AR, Cheikh RB, Cunha AM., *Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization*, Compos Science and Technology, Volume 7, Issue 6, pp. 1132-1138, 2007.



- [21] Trache D, Donnot A, Khimeche K, Benelmir R, Brosse N. *Physico-chemical properties and thermal stability of microcrystalline cellulose isolated from Alfa fibres*, Carbohydrate Polymer, Volume 104, pp. 223-230, 2014.
- [22] Hamza S., Saad H., Charrier B., Ayed N., Charrier - El Bouhtoury F., *Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster based composites*, Industrial Crops and Products, Volume 49, pp. 357-365, 2013.
- [23] Bahloul O., *Propriétés mécaniques, physiques et durabilité des mortiers à base de fibres cellulosiques (cas de l'alfa)*, Thèse de Magistère, Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger, 2006.
- [24] Essai d'affaissement : NFP 18-451 - *Consistance et Ouvrabilité des bétons à l'aide du Cône d'Abrams*, Normes Françaises, 2007.
- [25] Pierard J., Dieryck V., *Le retrait au jeune âge des bétons spéciaux*, CSTC, N°02, P. 4, Février 2004.
- [26] Ramaswamy H. S., Ahuja B. M., Krishnamoorthy S., *Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres*, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 5, Issue 1, pp. 3-13, 1983.
- [27] El-Hilali A., *Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales*, Thèse en génie civil, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise, 17 décembre 2009.
- [28] Bourzam A., *Effet des fibres de palmier sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres naturelles*, Thèse de Magistère, Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger, 1999.
- [29] Bouchekouk M., *Etude du béton renforcé par des fibres de verre enduites de polymères thermoplastiques*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1992.
- [30] AFPC-AFREM, LMDC, Projet National BHP 2000, ANDRA, Ecole Française du Béton, *Recommended methods for measuring of durability parameters, Proceedings of the technical AFPC/AFREM days on concrete durability*, pp. 125-134, Toulouse, 11 and 12 December 1997.
- [31] NF P 18-414. *Essais des Bétons – Essais Non Destructifs. Mesure de la Fréquence de Résonance Fondamentale*, AFNOR, 1993.
- [32] Swamy R.N., Mangat P. S., *Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 4, Issue 3, pp. 451-465, 1974.



- [33] Lewis G., Premalal M., *Natural vegetable fibres as reinforcement in cement sheets*, Magazine of Concrete Research, Volume 31, Issue 107, pp. 104-108, 1979.
- [34] Aziz MA, Paramsivam P, Lee SL., *Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction*, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 3, Issue 2, pp. 123–132, 1981.
- [35] Aggarwal L. K., *Bagasse-reinforced Cement Composites*, Cement and Concrete Composites, Volume 17, Issue 2, pp. 107-112, 1995.
- [36] Ali M. A., Singh B., *The effect of porosity on the properties of glass fibre-reinforced gypsum plaster*, Journal of Materials Science, Volume 10, Issue 11, pp. 1920-1928, 1975.
- [37] Wang Y, Wu HC, Li VC., *Concrete Reinforcement with Recycled Fibers. Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 12, N°. 4, pp. 314–319, 2000.
- [38] Grzybowski M., Shah S. P., *Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete*, Materials Journal, Volume 87, Issue 2, pp.138–148, 1990.
- [39] Keyvani A. S., Saeki N., *Behavior of fiber concrete composites using recycled steel shavings*, The Journal of solid waste Technology and Management, V. 24, N°. 1, pp. 1-8, 1997.
- [40] Morlier P., Khenfer M. M., *Effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécaniques des ciments renforcés de fibres cellulosiques*, Materials and Structures, Volume 24, Issue 3, pp. 185-190, 1991.
- [41] Aamr-Daya E, Langlet T, Benazzouk A, Quéneudec M. *Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles, physico-mechanical properties*. Cement and Concrete Composites, 30 (10): pp. 957–963, 2008.
- [42] Siddique R., Khatib J., Kaur I., *Use of recycled plastic in concrete: a review*, Waste Manage, 28 (10); pp. 1835–1852, 2008.
- [43] Chi J. M., Huang R., Yang C. C., Chang J. J., *Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete*, Cement and Concrete Composites, 25 (2); :pp. 197–205, 2003.
- [44] Saradhi Babu D., Ganesh Babu K., Trong-Huan W., *Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete*, Cement and Concrete Composites, 28 (6); 520–527, 2006.



- [45] Söylev T. A., Özturan T., *Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction*, Construction and Building Materials, 73; pp. 67-75, 2014.
- [46] Kriker A., *Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par des fibres en climat chaud et sec*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2005.
- [47] Barr B., Hoseinian S. B., Beigi M. A., *Shrinkage of concrete stored in natural environments*, Cement and Concrete Composites, 25 (1); pp. 19-29, 2003.
- [48] Neville A. M., *Properties of concrete*, 4th edition, Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, England, 1997.
- [49] Chen B., Liu J., *Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber*, Cement and Concrete Research, 34 (7); pp. 1259–1263, 2004.
- [50] Hossain K. M. A., *Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete*, Cement and Concrete Research, 34 (2): pp. 283–291, 2004.
- [51] Alduaij J., Alshaleh K., Haque M. N., Ellaithy K., *Lightweight concrete in hot coastal areas*, Cement and Concrete Composites, 21(5–6); pp. 453–458, 1999.
- [52] Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Sibata T., Mori H., *Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete*, Cement and Concrete Research; 29 (4); pp. 611–614; 1999.
- [53] Ding Q., Tian Y., Wang F., Zhang F., Hu S., *Autogenous shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete*, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 20 (40); pp. 123-125; 2005.
- [54] Mounanga P., Baroghel-Bouny V., Loukili A., Khelidj A., *Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro–macro correlations*, Cement and Concrete Research, 36 (1); pp. 110–122; 2006.
- [55] Baroghel-Bouny V., Mounanga P., Khelidj A., Loukili A, Rafai N., *Autogenous deformations of cement pastes: Part II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values*, Cement and Concrete Research, 36 (1); pp. 123-136, 2006..
- [56] Grasley Z. C., Leung C. K., *Desiccation shrinkage of cementitious materials as an aging poroviscoelastic response*, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 1, pp. 77-89, 2011.



- [57] Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M. M., Chabannet M., *Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*, Cement and Concrete Composites, 27 (5); pp. 554-564; 2005.
- [58] Li V. C., Kanda T., Lin Z. C., *Influence of Fibre / Matrix Interface Properties on Complementary Energy and Composite Damage Tolerance*, Key Engineering Materials, Vols; 145-149; pp. 465-472; 1997.
- [59] Kayali O., Haque M. N., Zhu B., *Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash*, Cement and Concrete Research, 29 (11); pp. 1835-1840; 1999.



Chapitre III : Etude de la durabilité des éco-bétons face à l'attaque sulfatique externe et à la sollicitation thermique

Chapitre III : Etude de la durabilité des éco-bétons face à l'attaque sulfatique externe et à la sollicitation thermique

I. Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé de nos jours pour la construction d'habitations, de ponts, de tunnel, de barrages ou d'autres ouvrages de génie civil. Les performances mécaniques, la durée de vie et la durabilité d'un béton font toujours l'objet de recherches scientifiques pour permettre d'apporter des solutions aux différentes pathologies à court et à long termes et maintenir le seuil des exigences qui portent sur différents critères comme les résistances mécaniques, l'étanchéité, la sécurité incendie, les performances thermiques et acoustiques et elles peuvent être contrôlées au fil du temps.

L'étude de la durabilité d'un ouvrage exposé à une pathologie à court ou à long terme vise à conserver dans les conditions prévues, les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien réduits. La détérioration d'un ouvrage sous l'effet de facteurs externes ou des phénomènes internes du béton entraîne une durabilité réduite [1], [2].

Les effets de l'attaque saline dans le cas des constructions sur des terrains gypseux ou dans les villes côtières, le gel/dégel dans les pays nordiques ou encore l'élévation de la température dans le cas des construction à haut risque lors d'un incendie comme le cas des centrales nucléaires,... provoquent des pathologies qui affectent la durabilité des ouvrages en béton. Des études passées et en cours dans ces domaines essaient d'appréhender les catastrophes liées à ces pathologies et de limiter leur impact sur la vie humaine et ce, pour une durée de vie économiquement raisonnable [3], [4], [5], [6], [7].

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à deux phénomènes auxquels le béton peut être exposé : l'attaque sulfatique externe et la sollicitation thermique.

II. L'attaque sulfatique externe

L'attaque sulfatique externe constitue avec l'attaque sulfatique interne, le deuxième risque majeur d'agression chimique du béton après la carbonatation.

II. 1. Généralités

L'attaque sulfatique interne fait l'objet, depuis de nombreuses années, de recherches [8] dans différents laboratoires : le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC de Paris), le Laboratoire des Sciences des Matériaux de l'université Pierre et Marie Curie - Paris VI ou encore le Laboratoire Matériaux et Durabilité de l'INSA de Toulouse, entre autres, se sont intéressés de près à la formation différée de l'étringite dans les bétons causée principalement par des attaques sulfatiques internes au béton [9], [10],[11].

Les recherches concernant les effets de l'attaque sulfatique externe sont quant à elles plus récentes et les premiers articles sur cette pathologie ne sont apparus que depuis quelques années [4], [12].

Deux types d'attaques sulfatiques externes sont répandus en Algérie. Ils peuvent être à l'origine de l'endommagement des constructions :

- la composition du sol comme les terrains gypseux qui peut contenir jusqu'à 85% de gypse à partir d'une profondeur de 12 m en zones urbaines ou de sols contenant beaucoup de sels [13], [14], [15], [16] (Figures III. 1 et III. 2) peut contribuer à l'endommagement des fondations d'un ouvrage et le fragiliser. Par temps de fortes pluies, certaines parties de la construction se retrouvent immergées dans des solutions souterraines contenant des doses importantes de sulfates qui vont pouvoir causer de l'endommagement et de la corrosion [17].
- La construction à proximité des zones industrielles génératrices de pollution atmosphérique peut être également exposée aux sulfates. C'est le cas en particulier à proximité des cimenteries (Figures III. 3) qui polluent l'atmosphère lors de la cuisson du clinker, composant principal du ciment [18] entraînant la propagation dans l'air de SO_2 à l'origine de l'acidification des eaux de pluie (H_2SO_4). C'est également le cas pour des constructions près d'usines de fabrication de batteries de voiture qui vont contribuer à la corrosion des matériaux ferreux et la détérioration des bétons à long terme [19].



Figure III. 1. *Présence d'une forte teneur en sel sur le sol de Loutaya - Walaya de Biskra dans le sud algérien*



Figure III. 2. *Echantillons de roches gypseuses (rose des sables de 20cm de long et 10 cm de large) qui existent dans les sols algériens*



Figure III. 3. *Origine de la pollution atmosphérique, exemple d'une cimenterie émettrice de SO_2 - Le cas de la cimenterie de Ain-Touta (Algérie) [18]*

II. 2. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer la durabilité des bétons renforcés avec des fibres d'alfa vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe et de la comparer à celle des bétons renforcés de fibres de polypropylène et des bétons ordinaires. Pour cela nous avons utilisé deux protocoles de vieillissement : le premier est l'immersion totale dans une solution saline et le second est l'immersion/séchage dans une solution saline identique à la première. En effet, avec un apport suffisant sous forme d'une solution saline, les sulfates de sodium peuvent réagir avec certaines phases hydratées du béton, notamment avec la portlandite et le mono-sulfo-aluminate de calcium, pour produire du gypse ou de l'ettringite (ou trisulfoaluminate de calcium) secondaire.

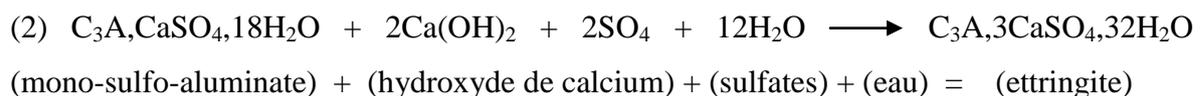
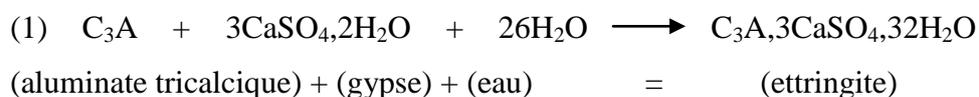
Il existe trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. Ce sont les conditions de leur formation qui les distinguent l'une de l'autre [20] :

- L'ettringite primaire : elle ne provoque pas d'expansion. Ce type d'ettringite est précoce et se forme dans les premiers moments de l'hydratation du ciment, lorsque la pâte est encore fluide, par réaction du gypse avec l'aluminate tricalcique (C_3A). Elle ne

provoque pas de gonflement car elle cristallise avant le durcissement du béton dans les espaces libres du composite. Sa formation entraîne simultanément une diminution de la porosité et une augmentation de la résistance mécanique du mélange, ce qui lui confère un rôle bénéfique dans le béton.

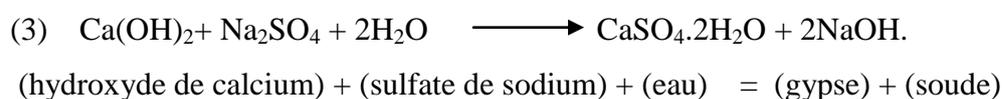
- L'ettringite dite différée ou DEF (Delayed Ettringite Formation) : elle se forme uniquement lorsque le béton subit à jeune âge des températures supérieures à 65-70°C. Dans ce cas, l'ettringite primaire ne peut se former lors de l'hydratation du ciment. Les cristaux d'ettringite peuvent se former tardivement dans le béton durci après refroidissement et le retour à la température ambiante. Ce type d'ettringite peut provoquer le gonflement du béton et conduire au phénomène d'expansion. C'est le cas de l'attaque sulfatique interne pour laquelle la source des ions sulfates provient de la déstabilisation préalable d'une grande quantité d'ettringite primaire. Ce processus nécessite la présence d'une humidité élevée.
- L'ettringite de formation secondaire ou tardive : elle se forme dans le béton durci et cristallise dans la porosité. Elle engendre alors des contraintes qui entraînent des désordres macroscopiques irréversibles (gonflement, fissuration, ruine du matériau,...). Cette ettringite résulte d'une attaque sulfatique externe et ne se forme que si le béton est en contact avec des sulfates et de l'eau.

L'ettringite secondaire peut se former soit à partir de l'aluminate tricalcique C_3A (1) présent dans la composition du clinker, soit du mono-sulfo-aluminate de calcium hydraté $C_3A, CaSO_4, 18H_2O$ (2). Le mono-sulfo-aluminate est un constituant de la pâte de ciment durci obtenu après l'hydratation du ciment.



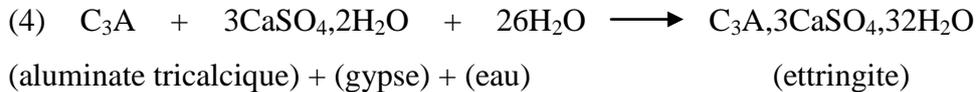
Dans le cas du sulfate de sodium Na_2SO_4 on a [21] :

La formation du gypse secondaire (3) :



Où le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est un produit expansif qui se forme uniquement dans la porosité de la pâte de ciment hydratée.

La formation de l'ettringite secondaire à partir du C_3A anhydre résiduel (4) = (2) :



Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et à la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur en des sulfates) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

Même si le mécanisme de dégradation par précipitation d'ettringite reste source de divergences, elle est tenue responsable des désordres observés lors d'une attaque sulfatique. Il est important de noter que l'ettringite, qui se forme habituellement pendant les premières heures de l'hydratation du béton, peut demeurer naturellement présente dans la pâte de ciment sans causer de désordre.

II. 3. Matériel et méthodes

II. 3. 1. Matériel

Les échantillons ont été confectionnés à l'IUT de Génie Civil de St Nazaire (laboratoire GeM). Les formulations des différents bétons étudiés sont données par le tableau III. 1.

Tous les échantillons ont été conservés dans une chambre à 20°C avant la date des essais.

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont de dimensions 7x7x28 cm (Figure III. 4). Pour disposer d'un nombre suffisant d'éprouvettes et réaliser des essais normalisés (3 échantillons par essai), nous avons scié (Figure III. 5) chaque éprouvette 7x7x28 cm en 3 éprouvettes cubiques 7x7x7 (Figure III. 6).

Tableau III. 1. Proportions pour $1m^3$, des différents bétons étudiés

Proportion pour $1m^3$ de béton	Mix code				
	OC	AC-0.1	AC-1	AC-1.5	PC
Ciment (kg)	350	350	350	350	350
Eau (l)	168	168	168	168	168
Sable (kg)	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8
Granulats 4-12 (kg)	432	432	432	432	432
Granulat 12-20 (kg)	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2
Fibre d'Alfa humides (kg)	0	0.3	8.4	12.7	0
Fibres de Polyprop. (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0
Superplastifiant (g)	280	190	280	280	190



Figure III. 4. Echantillons de bétons de dimension 7x7x28 cm.



Figure III. 5. Scie ayant servi au découpage des éprouvettes 7x7x28 cm en 7x7x7 cm.



Figure III. 6. *Cube 7x7x7 cm découpé à partir de l'éprouvette 7x7x28 cm.*

II. 3. 2. Méthodes

Pour étudier l'effet de l'attaque sulfatique externe sur nos bétons, nous avons utilisé deux protocoles, développés en II. 4 et II. 5 qui favorisent le développement de pathologies d'après [4].

- Protocole 1 : En immersion complète dans une solution de sulfate de sodium à 20°C.
- Protocole 2 : Par cycles immersion / séchage avec une solution de sulfate de sodium.

Dans les deux cas nous avons utilisé une solution dosée à 12,5% en masse de Na_2SO_4 afin de comparer les résultats des deux expériences. La teneur en sels élevée a pour but d'accélérer le plus possible l'effet de l'attaque sulfatique externe tout en évitant des conditions de sursaturation à 20°C, température des conditions expérimentales de la salle où ces études ont été menées (Figure III. 7).

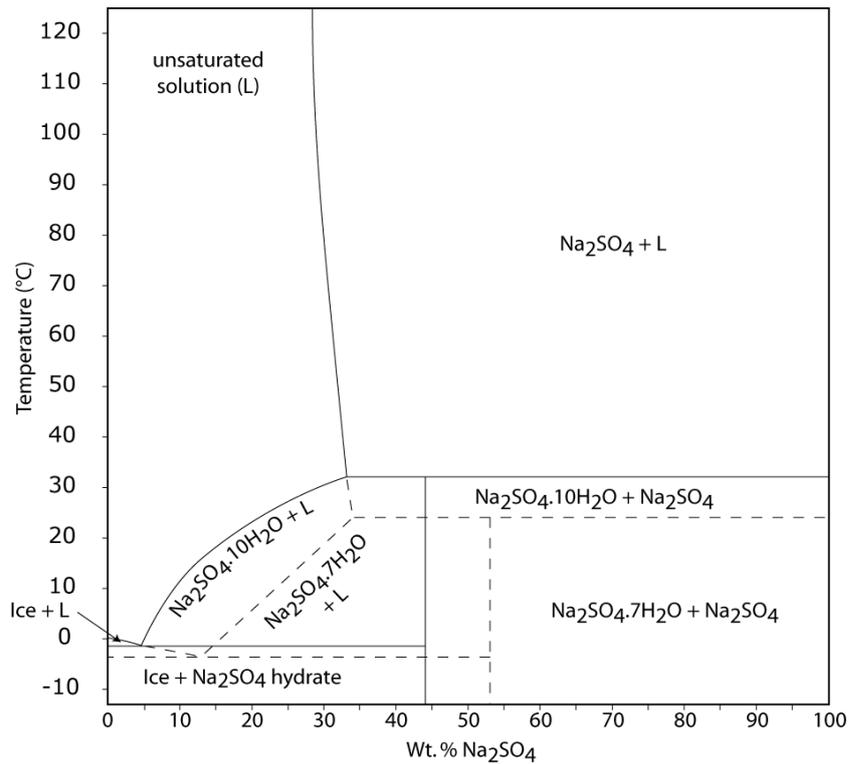


Figure III. 7. Diagramme de phase de la cristallisation des sels in [22] d'après [23].

II. 4. L'immersion complète

C'est le protocole le plus fréquemment utilisé dans la bibliographie pour simuler une attaque sulfatique des bétons dans des sols salins comme les sols gypseux [24], [25].

II. 4. 1. Protocole expérimental

Les éprouvettes cubiques (7x7x7 cm) de béton sont immergées complètement dans une solution saline à 12,5% en masse de Na₂SO₄ à 20°C renouvelée tous les 30 jours.

Pour suivre l'évolution du comportement des échantillons soumis à l'attaque sulfatique externe au cours du temps, nous avons opté pour le suivi de masse à différents intervalles de temps sur une période de 600 jours, le calcul de la résistance à la compression des échantillons des différents bétons après 0, 45 jours, 90 jours, 365 jours et 545 jours et l'observation à l'œil nu.



Figure III. 8. *Immersion des échantillons de béton dans la solution saline à 12,5% en masse de Na₂SO₄*

Le nombre d'échantillons étudiés en immersion complète par type de béton est donné par le Tableau III. 2 :

Tableau III. 2. *Nombre d'échantillons utilisés pour l'immersion complète*

Type de béton	Nombre d'éprouvettes 7x7x7 cm
AC-0,1	12
AC-1	12
AC-1,5	12
PC	12
OC	12
Total	60

II. 4. 2. Résultats et discussion

II. 4. 2. 1. Suivi de masse

Les échantillons sont pesés à la sortie de l'immersion complète, après avoir été préalablement essuyés avec du papier (Figure III. 9).

La Figure III. 10 montre l'évolution du suivi de masse en fonction du temps d'immersion complète des cinq échantillons de béton.



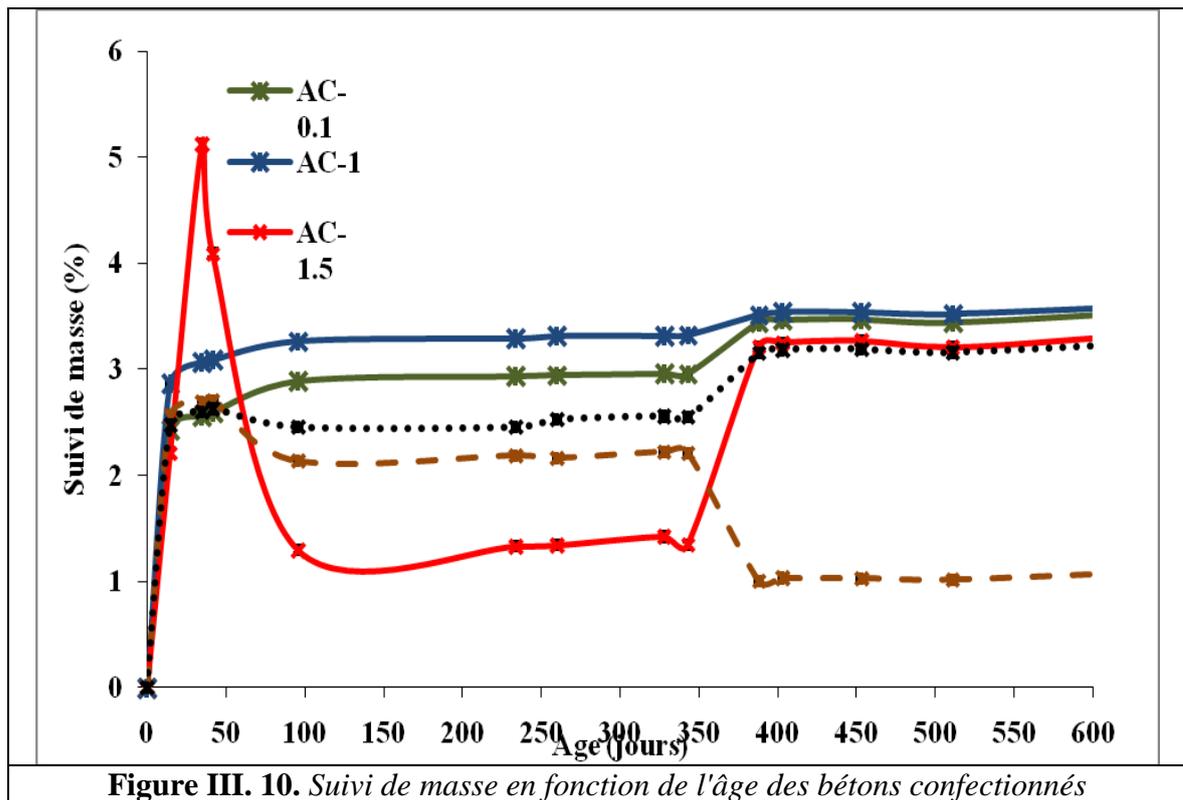
Figure III. 9. *Pesée des masses des échantillons*

Nous remarquons (Figure III. 10) que les bétons AC-0.1, AC-1 et BO se comportent d'une manière identique, avec une prise de masse de l'ordre de 3% après plus de 20 mois d'immersion.

Contrairement aux autres bétons, AC-1.5 subit une perte de masse entre 35 et 343 jours suivie d'une prise de masse entre 343 et 388 jours et qui se stabilise jusqu'à la fin de l'immersion complète des échantillons.

Le béton PC se comporte d'une manière identique à AC-0.1, AC-1 et OC jusqu'à 343 jours puis subit une perte de masse de 343 à 388 jours contrairement aux autres avant de se stabiliser jusqu'à la fin du protocole.

On remarque que pour tous les bétons, il y a une prise de masse identique de 0 à 42 jours ensuite un premier palier ou plateau dans lequel la masse de nos échantillons s'est stabilisée de 42 à 343 jours. Ce premier plateau évolue entre 343 et 388 jours vers un deuxième plateau (évolution linéaire avec masse constante) de 388 à 619 jours soit avec une prise de masse pour les bétons OC, AC-0.1, AC-1 et AC-1.5 soit avec une perte de masse pour le PC.



La comparaison entre OC, AC-0.1 et AC-1 suggère que plus il y a de fibres d'alfa, plus la prise de masse est importante. AC-1.5 ne s'intègre pas dans cette logique. En effet, ce béton présente un gain de masse plus important que celui des autres bétons jusqu'à 35 jours suivi d'une perte de masse assez importante comparée à celle des autres bétons de 35 à 96 jours avant une stabilisation jusqu'à 343 jours puis un gain de masse jusqu'à 388 jours et une deuxième stabilisation de la masse jusqu'à la fin du protocole. Cette différence de comportement pourrait être due à la teneur élevée de fibres d'alfa qui forment des pelotes empêchant une bonne homogénéisation du béton lors du gâchage. De plus les fibres confèrent au béton plus de porosité, ce qui diminue sa résistance.

De 0 à 50 jours (Figure III. 11) les bétons OC, PC et AC-0.1 ont un comportement similaire vis-à-vis du suivi de masse, ce qui est normal car ils ont des compositions et propriétés très proches (e.g. porosité ; Figure II. 15 du Chapitre II) vu la faible quantité de fibres qu'ils contiennent. La prise de masse est donc principalement gérée par la porosité matricielle.

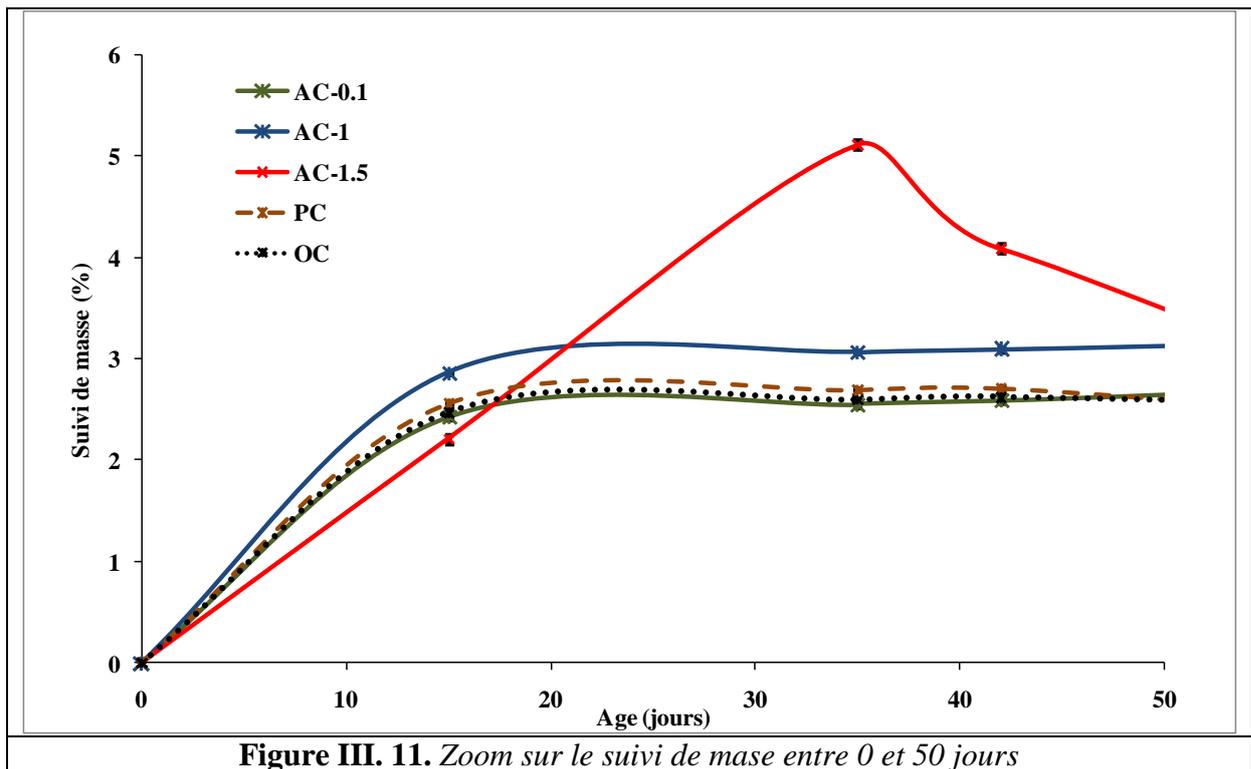


Figure III. 11. Zoom sur le suivi de mase entre 0 et 50 jours

AC-1 suit la même évolution que les bétons OC, PC et AC-0.1 mais avec une prise de masse légèrement supérieure probablement due à la teneur en fibres plus élevée. La prise de masse est donc liée à la porosité matricielle ainsi qu'à la porosité des fibres qui, ainsi que présenté en microscopie électronique à balayage sur la figure II. 3 du Chapitre II.

AC-1.5 se comporte différemment. Sa prise de masse plus élevée pourrait être due à sa teneur en fibres supérieure, néanmoins elle est plus lente, plus linéaire et étalée sur une durée plus longue que pour les autres échantillons.

La prise de masse totale, de 0 jours à 612 jours, n'excède pas 3,5% pour les bétons OC, AC-0.1, AC-1 et AC-1.5 et 1% pour le PC. La prise de masse est donc très faible après 619 jours d'immersion complète dans une solution dosée à 12,5% de Na_2SO_4 , ce qui ne suggère pas de cristallisation massive d'étringite ou d'autres sulfates, et par conséquent pas d'évidence d'attaque sulfatique externe de nos bétons au cours de ce test.

II. 4. 2. 2. Variation de la résistance à la compression

Les échantillons des différents bétons sont extraits de la solution saline à différentes durées afin de subir des tests de résistance mécanique en compression et suivre l'évolution de celle ci

au cours du temps. Les résistances en compression sont mesurées en compression simple au laboratoire du L2MGC, sur une presse hydraulique INSTRON de 3000 kN pilotée par un ordinateur (Figure III. 12)



Figure III. 12. Tests de compression simple des échantillons

La Figure III. 13 montre la résistance à la compression en fonction du temps d'immersion complète des cinq types de béton. Trois échantillons ont été testés par béton pour chaque échéance ou durée d'immersion.

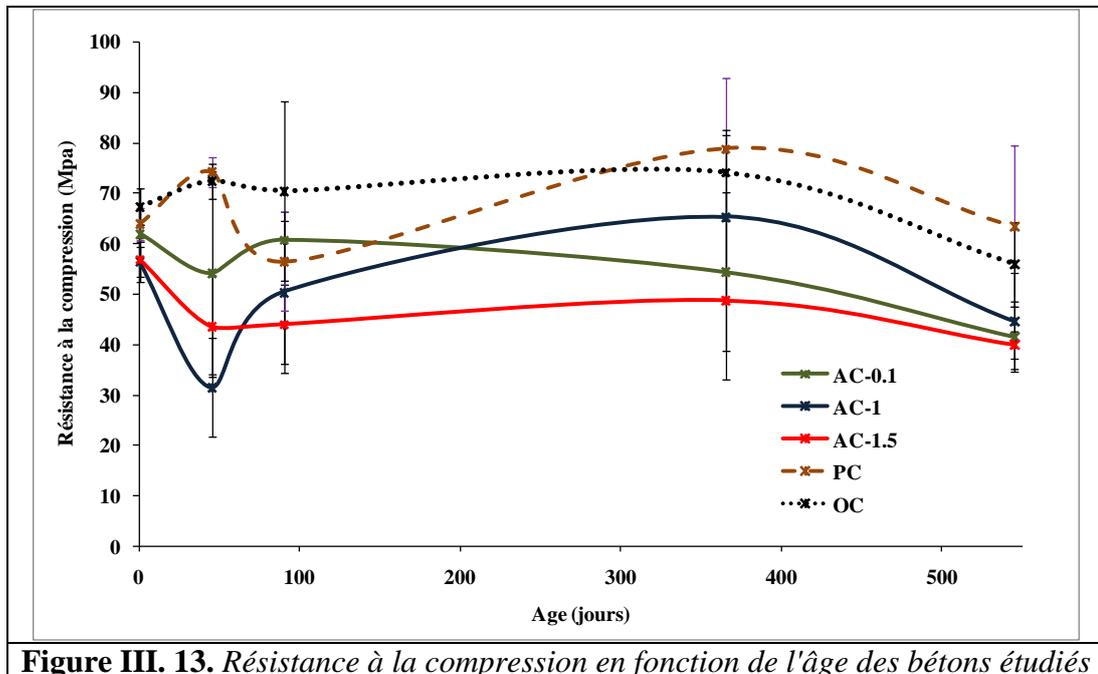


Figure III. 13. Résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons étudiés

On remarque que de 0 à 45 jours, les résistances à la compression des bétons PC et OC augmentent respectivement de 16% et 8% tandis qu'elles diminuent pour les trois bétons aux Mohammed-Rissel KHELIFA

fibres d'alfa AC-0.1, AC-1 et AC-1.5 respectivement de 13%, 44% et 24% avant que la tendance ne s'inverse légèrement entre 45 et 90 jours pour les AC-0.1 (+3%), AC-1.5 (+1%) et OC (-1%) et significativement pour le AC-1 (+14%) et pour le PC (-5%).

Entre 3 mois et 1 année, les résistances des différents bétons exposés à l'immersion complète augmentent d'une manière lente, progressive et continue sauf pour le AC-0.1 qui diminue.

Après 365 jours et jusqu'à 545 jours, tous les bétons accusent une diminution de la résistance à la compression par rapport aux résistances à la compression à 0 jour d'exposition à l'immersion complète à savoir, -33% pour le AC-0.1, -21% pour le AC-1, -30% pour le AC-1.5, -0.7% pour le PC et -17% pour le OC avec les résistances respectives finales de 40,40 MPa, 44, 58 MPa, 39.89 MPa, 63,38 MPa et 55,82 MPa. La meilleure résistance en compression après 545 jours d'immersion est obtenue pour le béton renforcé aux fibres de polypropylène, suivie du béton ordinaire puis par le béton à 1% de fibres d'alfa, qui présente toujours une bonne résistance pour un béton de structure.

II. 4. 2. 3. Observation macroscopique

Après 18 mois d'immersion complète, nos échantillons ne montrent aucun signe de gonflement ou de fissuration visible à l'œil nu (Figure III. 14) ce qui suggère l'absence d'une attaque sulfatique externe importante.



Figure III. 14. Photos des échantillons juste à leur sortie de la solution saline après 18 mois d'immersion totale et avant l'écrasement à la compression

II. 4. 2. Conclusion

A l'issue de cette étude qui a duré près de 18 mois nous pouvons conclure que :

- Il n'y a pas eu de perte ou de gain de masse significatif du début à la fin de l'expérience. Une légère augmentation de masse est observée due à la saturation en solution saline.
- Nous avons observé une diminution de la résistance mécanique à la compression de 0,7% à 21% pour les bétons optimaux à savoir le PC (0,70%), le OC (16,95%) et le AC-1(20,89%) et de l'ordre de 30% pour le AC-0.1 et le AC-1.5.
- Aucun endommagement (gonflement, fissuration) n'a été observé macroscopiquement à la surface des échantillons, et par conséquent aucune évidence de cristallisation d'ettringite.

Tous ces résultats suggèrent qu'il n'y a pas eu d'attaque sulfatique externe suffisamment importante pour engendrer un endommagement visible à l'œil nu.

Ces résultats s'accordent avec les travaux de Khelifa M. R [4]. En effet il a remarqué que la plus faible résistance aux sulfates était celle du béton dont le E/C était le plus élevé, en comparant celle d'un béton dont $E/C = 0,59$ et un autre béton ayant $E/C = 0,49$. Les deux bétons étaient à base d'un même ciment mais c'est la différence du rapport E/C qui modifie leur comportement vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe. Celui dont le rapport $E/C = 0,59$ s'est dégradé plus vite et de manière plus importante que celui dont le rapport $E/C = 0,49$, c'est probablement, l'effet de la porosité et c'est pratiquement le même rapport E/C le nous avons choisi, à savoir $E/C = 0,48$.

II. 5. Cycles d'immersion/séchage à 60°C

Toute cette étude a été suivie par Olivier Tronel, dans le cadre de son stage de fin d'étude en génie civil à l'IUT de Cergy-Pontoise.

Ce test est basé sur les tests de vieillissement des bétons existant dans la bibliographie [4] et les tests normalisés de vieillissement des pierres sous l'effet de la précipitation des sels [26].

II. 5. 1. Protocole expérimental

C'est un protocole d'accélération du vieillissement des bétons basé sur des cycles d'immersion/séchage de 24 heures définis comme suit [4]:

- Immersion (4 heures) des éprouvettes dans une solution de sulfate de sodium à 12,5% de Na_2SO_4 en masse.
- Séchage (20 heures) dans une étuve à 60° (Figure III. 15).

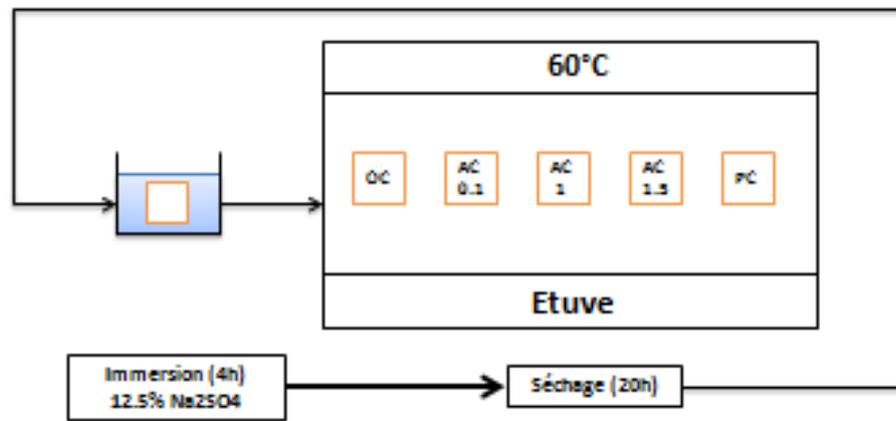


Figure III. 15. Protocole expérimental de l'immersion/séchage à 60°C

A 60°C , température de séchage des échantillons, la superposition de l'attaque sulfatique externe et de l'attaque sulfatique interne est impossible car aucun cas de formation différée de l'ettringite n'a été détectée pour des températures inférieures à 65°C [9, 27, 28].

Quotidiennement, la masse de chaque échantillon est relevée après la phase de séchage, c'est à dire juste avant l'immersion ainsi qu'une analyse visuelle des échantillons est menée à l'échelle macroscopique (prise de photos).

Les éprouvettes sont été testées à la compression simple à 0, 5, 15 et 45cycles pour suivre l'évolution de leurs performances mécanique en fonction des cycles immersion/séchage à 60°C .

L'étude macroscopique des échantillons montre une altération de certains échantillons contrairement à l'immersion complète, ce qui nous a poussé à compléter cette étude par une étude microscopique par microscope électronique à balayage (MEB) pour mieux observer la

microstructure des bétons étudiés et mieux comprendre le phénomène d'altération par immersion/séchage à 60°C face à l'attaque sulfatique externe.

Le nombre d'échantillons étudiés en immersion/séchage à 60°C est donné par le Tableau III. 3:

Tableau III. 3. Nombre d'échantillons étudié

Type de béton	Nombre d'éprouvettes 7x7x7 cm
AC-0.1	6
AC-1	6
AC-1.5	6
PC	6
OC	6
Total	30

II. 5. 2. Résultats et discussion

II. 5. 2. 1. Suivi macroscopique

Durant toute la durée de l'expérience des photos ont été prises régulièrement avant et après immersion, permettant ainsi d'obtenir des informations visuelles sur l'évolution macroscopique des échantillons ainsi que l'apparition d'éventuels endommagements (Figure III. 16).

On remarque bien une évolution des bétons AC-0.1 et AC-1 dans le temps avec une dégradation importante à la base des échantillons avec des pertes de matière à 45 jours. On observe aussi de la desquamation sur les autres faces de ces échantillons. Pour le béton AC-1.5, aucune dégradation liée aux sels n'est remarquée. On peut souligner que plus le pourcentage de fibres d'alfa est important dans le béton, moins il y a d'efflorescence sur les faces supérieures des échantillons. Les fibres naturelles, lorsqu'elles sont présentes en plus grande quantité, semblent jouer un rôle d'absorption de la solution, ce qui ne permet pas la cristallisation en surface. Les efflorescences sont quasi inexistantes sur le AC-1.5 et le PC. Les fibres de propylène n'absorbent pas de l'eau lors de la confection du béton, donc n'engendre pas de pores lors du séchage à 60°C et donc plus le béton renforcé de fibres de propylène résistent bien et dès le début à l'attaque sulfatique externe.

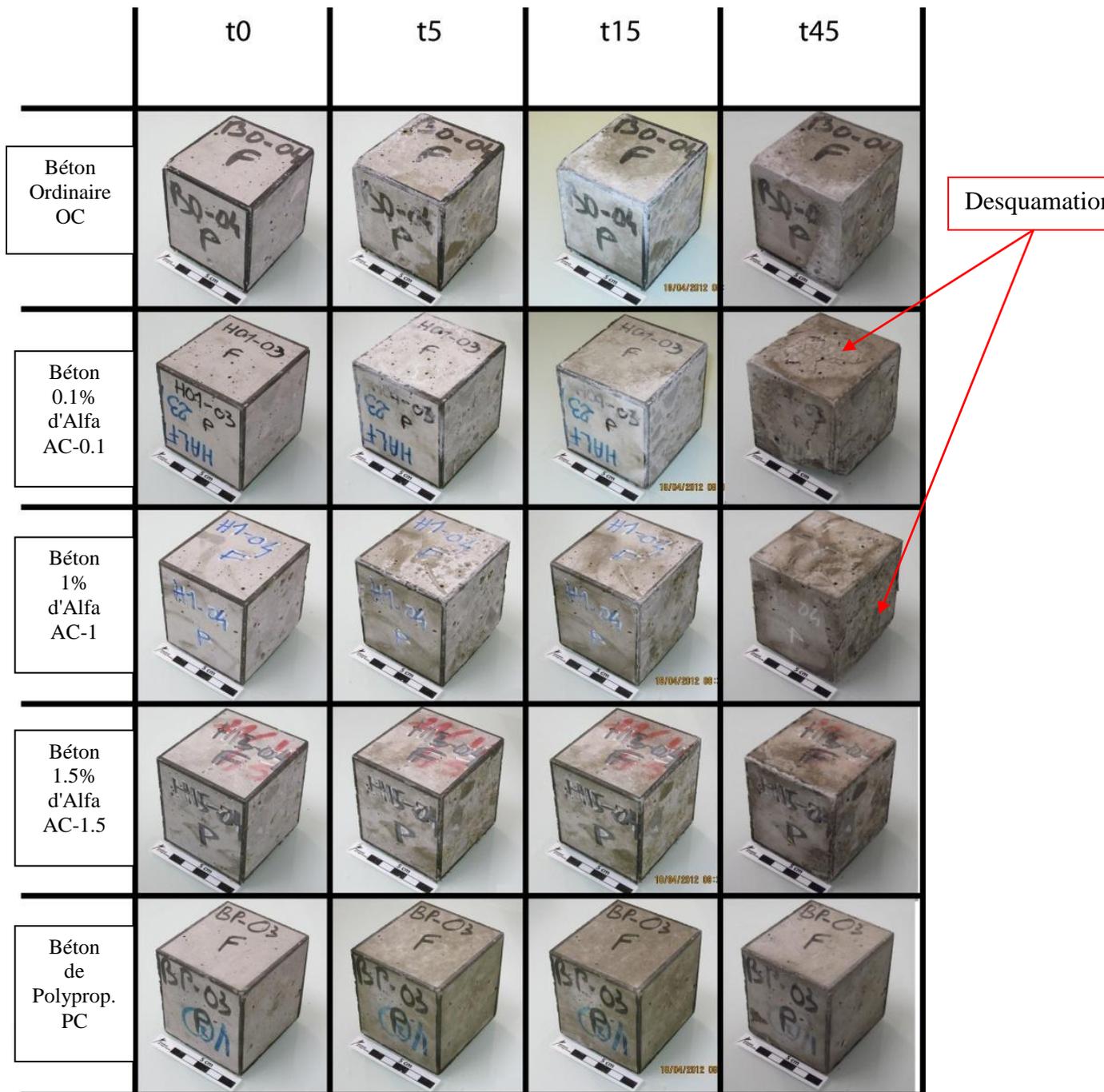


Figure III. 16. Suivi macroscopique

II. 5. 2. 2. Suivi de masse

* Suivi de masse des bétons dégradés et du béton témoin

Dans un premier temps, nous avons voulu étudier l'évolution de la masse des échantillons dégradés (AC-0.1 et AC-1) et celle du béton témoins OC :

La Figure III. 17 montre l'évolution de masse de tous les bétons ordinaires OC après séchage en fonction du nombre de cycles. Entre t0 et t45, les échantillons ont pris de 2 à 3% de masse

ce qui est interprété comme le résultat de la cristallisation de sels et le piégeage de solution à l'intérieur de la porosité du béton. La prise de masse n'est pas régulière et homogène. Elle monte brutalement dès le premier cycle et se stabilise jusqu'au 37^{ème} cycle. A partir de ce dernier cycle, on remarque une nette augmentation jusqu'au 41^{ème} cycle avant une faible pente décroissante, assez régulière qui pourrait suggérer un éventuel début d'endommagement par perte de fragments d'échantillons. Les échantillons OC₃ et OC₄ ont subi une perte de masse due à un léger détachement de béton au niveau des arrêtes et l'apparition de desquamation.

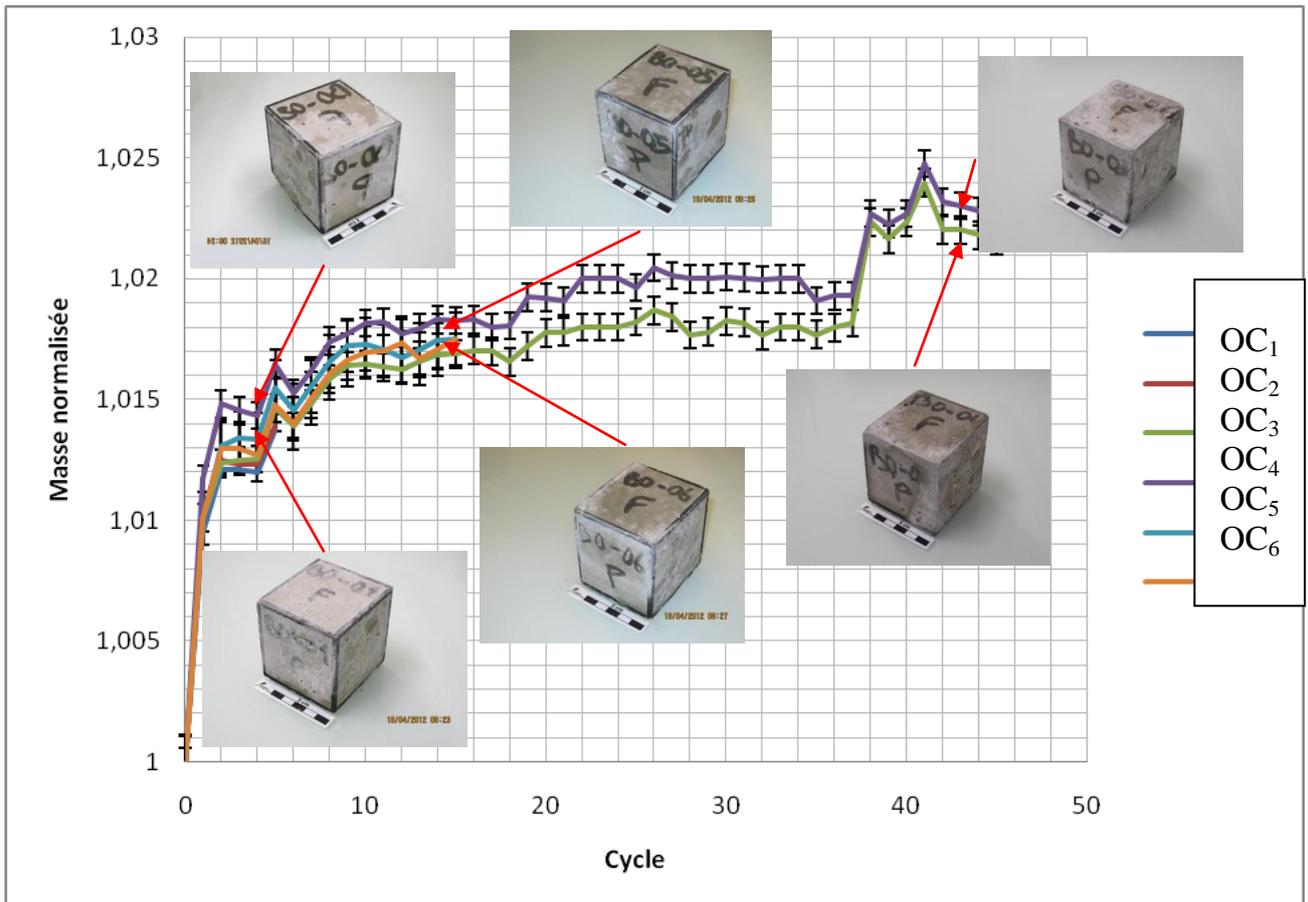


Figure III. 17. Suivi de masse après séchage du béton OC en immersion/séchage à 60°C dans une solution saline à 12.5% en NaSO₄

Comme représenté sur la Figure III. 18, pour les AC-0.1, on observe une première phase de prise de masse rapide entre le 1^{er} et le 15^{ème} cycle, suivie d'une deuxième phase de stabilisation de la masse, puis une phase de perte de masse entre le 38^{ème} et le 45^{ème} cycle. L'échantillon AC-0.1₃ subit lors du 41^{ème} cycle une perte de masse brutale due au

détachement de plusieurs morceaux de bétons et d'une desquamation prononcée sur plusieurs surfaces, c'est la ruine de l'échantillon.

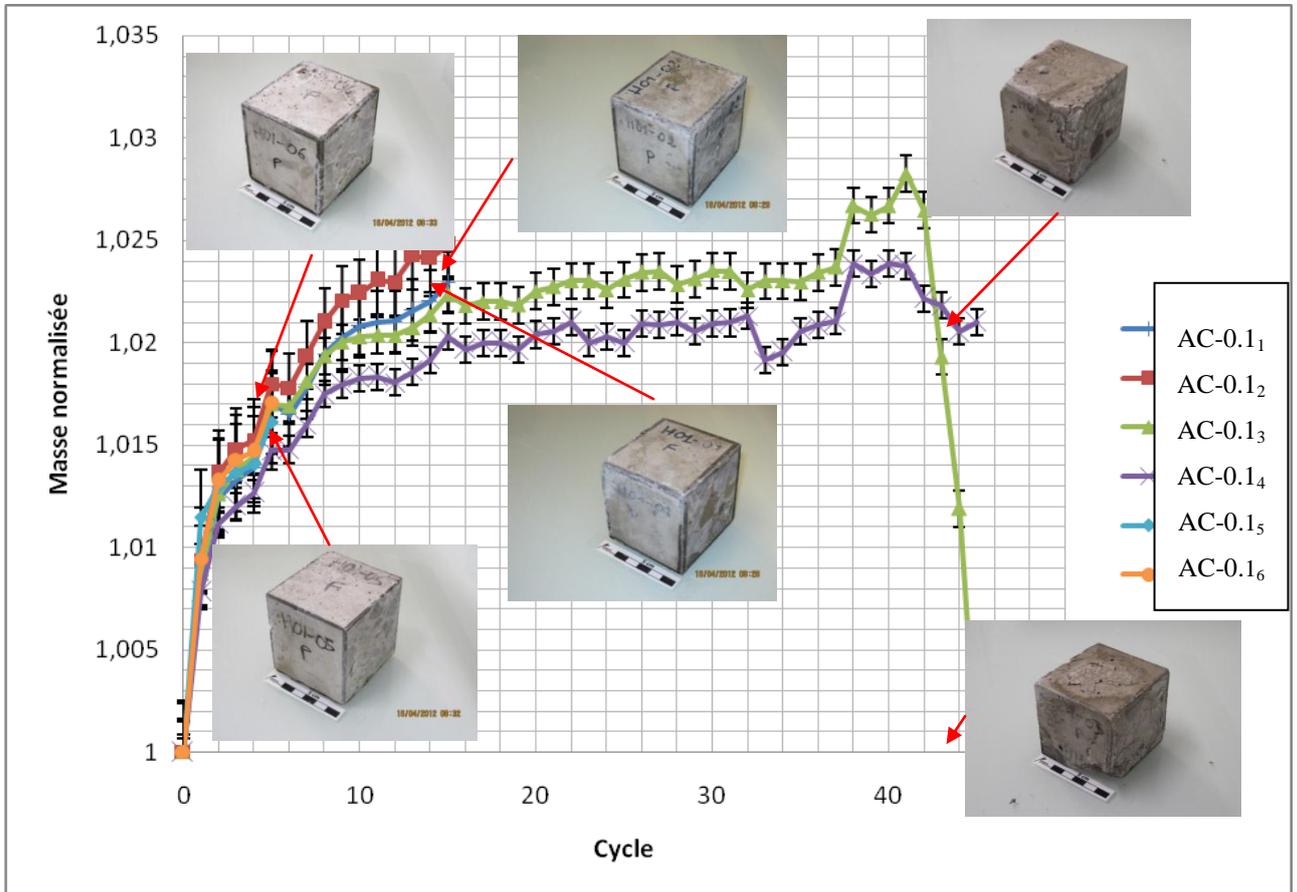


Figure III. 18. Suivi de masse après séchage du béton AC-0.1 en immersion/séchage à 60°C dans une solution saline à 12.5% en NaSO₄

Une prise de masse importante est observée au début des cycles pour les bétons AC-1 comme le montre la Figure III 19, puis augmente lentement tout au long du protocole pour finalement atteindre un gain de masse de 3 à 3.5%.

On constate le même comportement pour les bétons à 1.5% d'alfa (AC-1.5) et les bétons au polypropylène (PC).

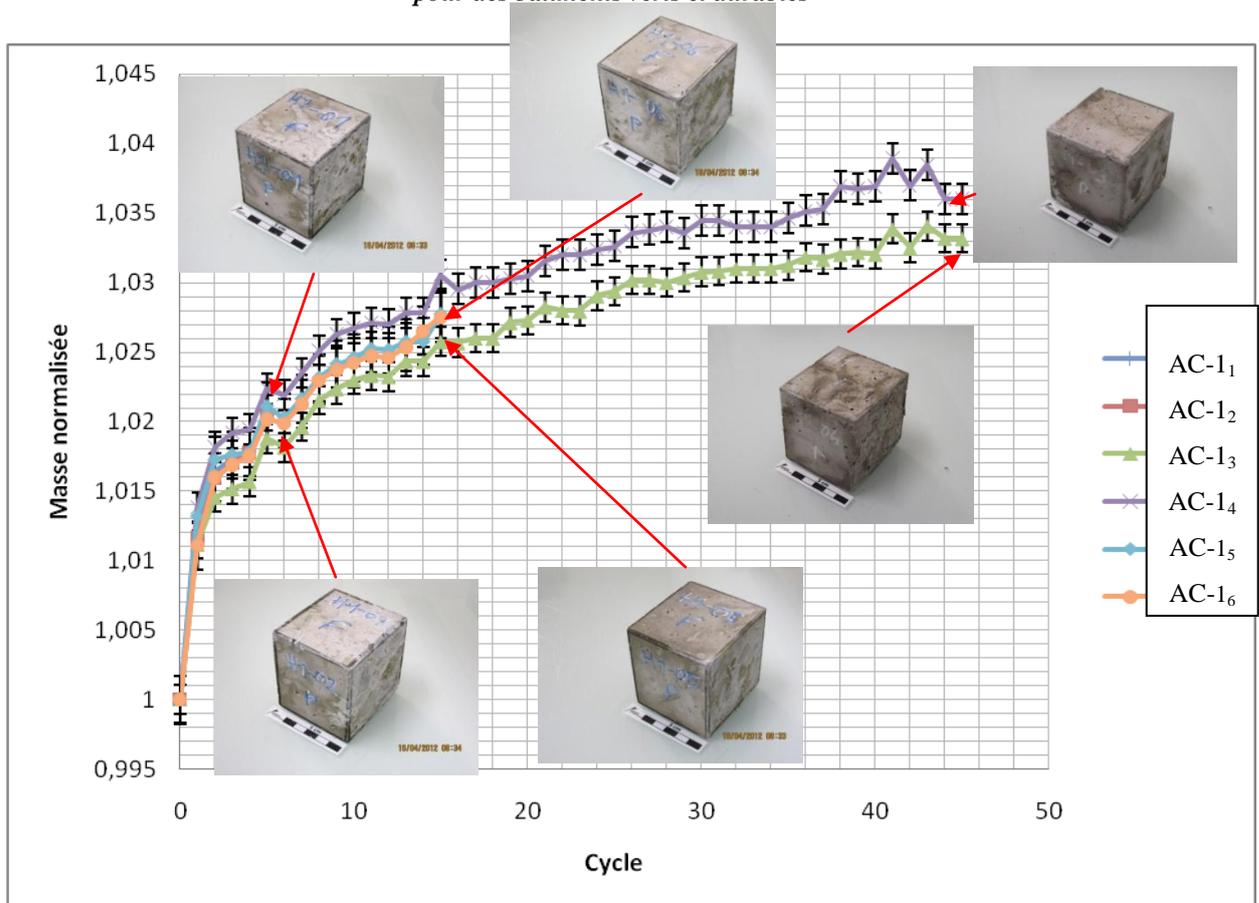


Figure III. 19. Suivi de masse après séchage du AC-1 en immersion/séchage à 60°C dans une solution saline à 12.5% en $NaSO_4$

On remarque que le suivi de masse de chaque type de béton suit exactement la même tendance. Les six échantillons évoluent exactement de la même manière tout le long des 45 cycles, ce qui montre la représentativité de l'évolution du suivi de masse des six échantillons de chaque type de béton.

*** Suivi de masse de tous les bétons étudiés**

L'évolution du suivi de masse suit la même tendance pour tous les bétons (Figure III. 20). Quelques points irréguliers (à 6 et 16 jours) dus probablement au changement de l'opérateur (prise des mesures immédiate ou lente), à la température de la pièce ou encore au taux d'humidité de la pièce.

Les bétons OC et AC-1 ont un comportement très proche vis-à-vis du suivi de masse, ils enregistrent un gain de masse final de l'ordre de 1,5%. De même, le AC-1 et le AC-1.5 sont quasiment identiques du début du protocole jusqu'à la fin. Ils enregistrent la prise de masse la

plus importante et qui se situe aux alentours de 3,5%. Quant- au PC, il se comporte d'une manière identique aux AC-1 et AC-1.5 jusqu'au 15ème cycle puis poursuit son évolution dans la même tendance mais d'une manière moins importante. Sa prise de masse est de l'ordre de 2,5%.

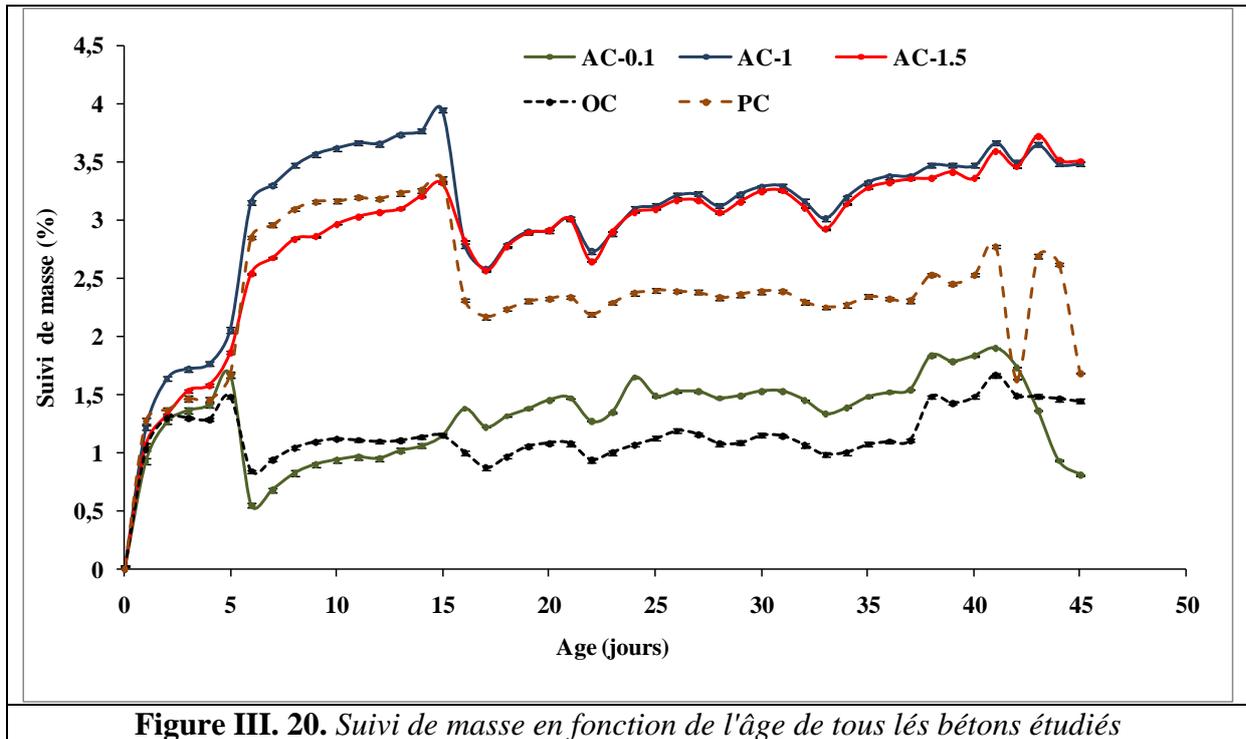


Figure III. 20. *Suivi de masse en fonction de l'âge de tous les bétons étudiés*

II. 5. 2. 3. Variation de la résistance à la compression

La figure III. 21 présente l'évolution des résistances à la compression de tous les bétons étudiés à 0, 5, 1 et 45 jours de cycles d'immersion/séchage. On remarque que les résistances à la compression augmente de 0 à 15 jours, ce qui peut s'expliquer par la cristallisation de sels dans la porosité du béton [9] qui renforce la structure. Au bout de 4 cycles, on observe une diminution des résistances à la compression sauf pour PC et AC-1. La diminution de la résistance à la rupture est interprété comme le résultat de l'endommagement lié à l'attaque sulfatique externe, ce qui ne semble pas être le cas pour les bétons PC et AC-1.

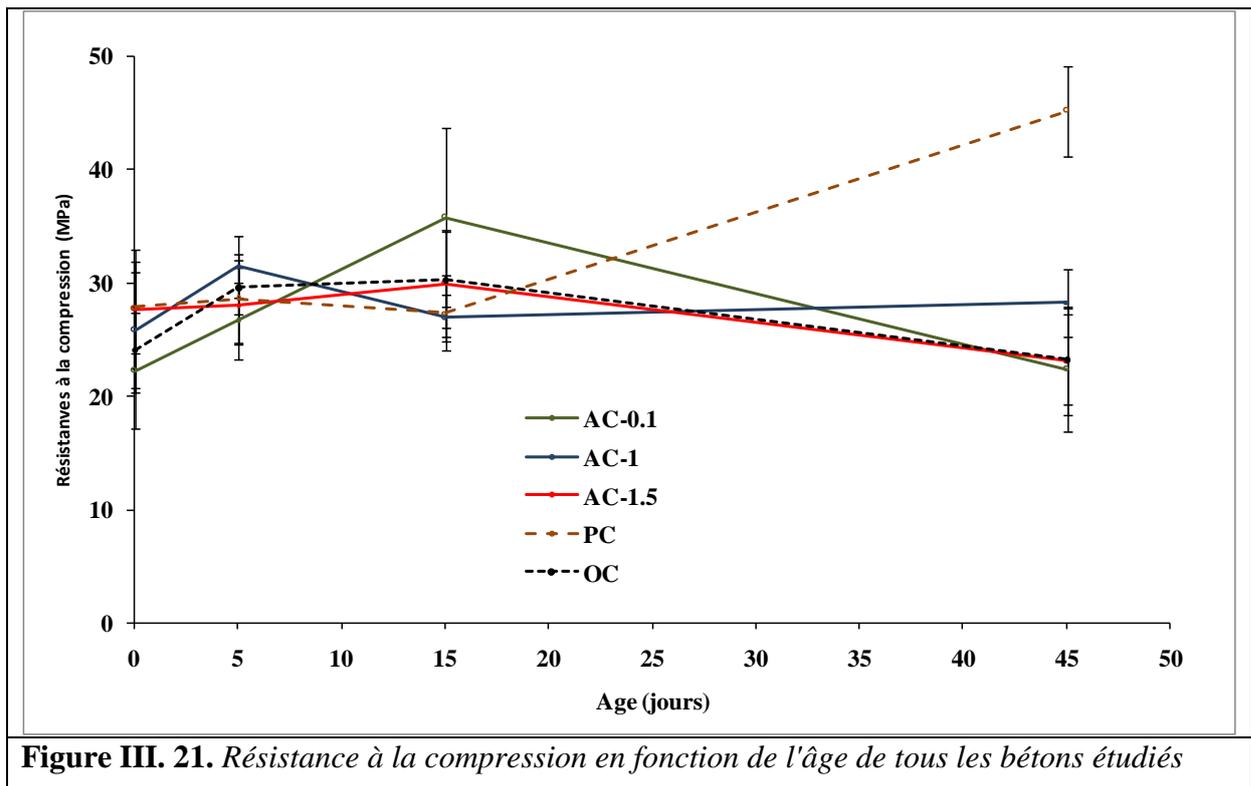


Figure III. 21. Résistance à la compression en fonction de l'âge de tous les bétons étudiés

On remarque que l'évolution des résistances à la compression des béton CP et AC-1 se ressemblent, un premier palier de 0 à 5 jours où les résistances augmentent, suivi par une légère chute des résistances de 5 à 15 jours puis une augmentation des résistances de 15 à 45 jours, même si celle du béton renforcé de fibres de polypropylène est plus importante. Le béton AC-1 présente des signes visibles de début de ruine à 45 jours (Figure III. 16).

Pour les trois bétons restants, on remarque une augmentation des résistances à la compression de 0 à 15 jours suivie d'une diminution progressive de 15 à 45 jours. Le béton AC-0.1 est le béton le plus altéré par l'attaque sulfatique externe à 45 jours d'après les photos données par la Figure III. 16.

II. 5. 2. 4. Etude microscopique (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisé pour ce travail est celui du Laboratoire de Mécanique et de Matériaux du Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise. C'est un modèle LEICA S430i avec une tension d'accélération de faisceau de 15 KEV à 20 KEV et un courant de sonde de 150 PA à 250 PA (Figure III. 22).



Figure III. 22. *Microscope électronique à balayage de L2MGC*

A. Préparation des échantillons

Des morceaux de bétons de près de 2 cm² ont été prélevés sur les éprouvettes prismatiques de OC, AC-1et PC après les essais de résistance mécanique en compression. Ces échantillons sont placés sous vide pour la phase de métallisation en or (Figure III. 23). Une fois cette opération terminée, les échantillons sont observés au MEB en utilisant principalement la technique des électrons rétrodiffusés (BSE = Back Scattered Electron).



Figure III. 23. *Machine de métallisation*

B. Observations au MEB

B. 1. Béton OC

A 0 cycles, les figures III. 24 et III. 25 ne montrent pas l'existence de l'ettringite dans le béton ordinaire, ce qui suggère l'absence de l'ettringite primaire dans ces bétons avant leur exposition à l'immersion/séchage à 60° dans la solution saline à 12,5% en masse de Na₂SO₄.

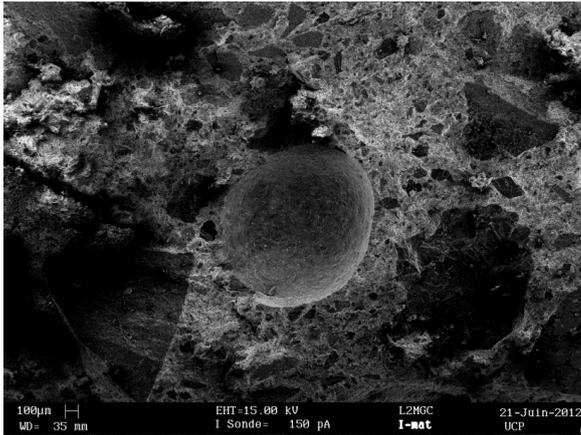


Figure III. 24. Vacuole du BO

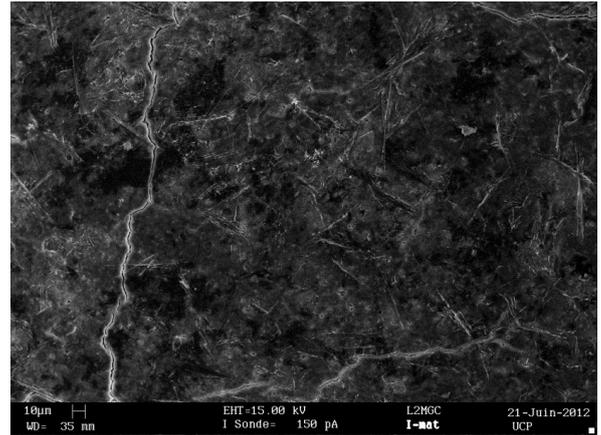


Figure III. 25. Surface du béton ordinaire

A 15 cycles, jours, on observe la présence d'aiguilles d'ettringite dans de nombreuses vacuoles (figures III. 26 et III 27) mais pas dans la pâte ou aux interfaces pâte/granulat, ce qui est cohérent avec une attaque sulfatique peu significative

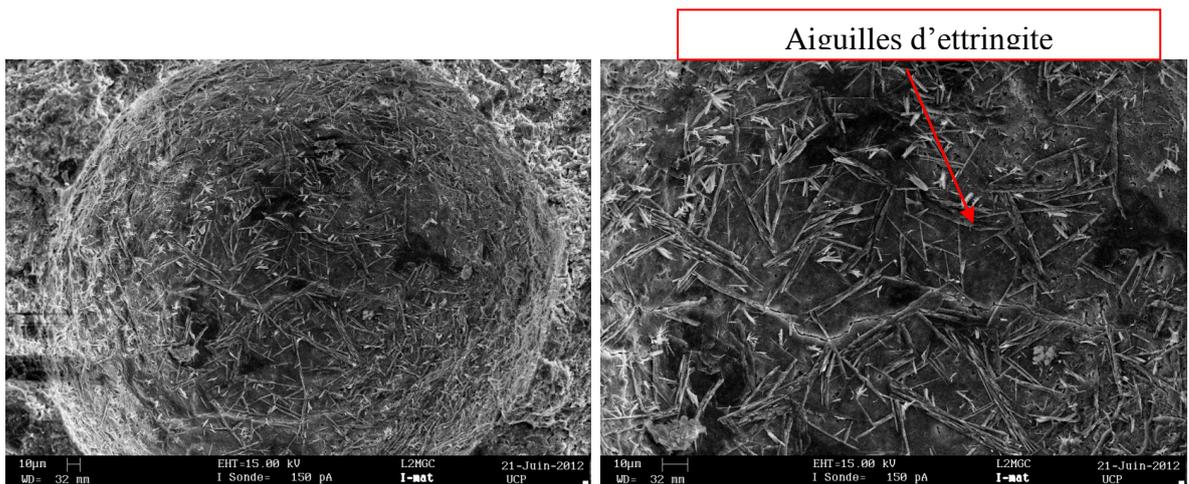


Figure III. 26. Présence nombreuse d'aiguilles d'ettringite dans les vacuoles du béton OC

Figure III. 27. Vacuole du OC zoomée

B. 2. Béton AC-1

La Figure III. 28 zoomée sur la Figure III. 29, montrent clairement l'absence d'ettringite primaire au niveau des vacuoles et dans la pâte de ciment à 0 cycle pour le béton AC-1.

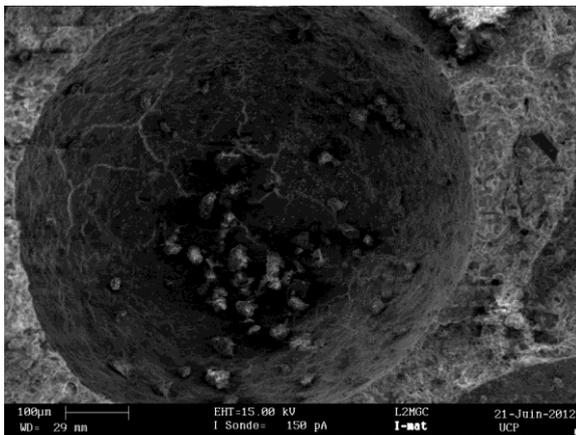


Figure III. 28. Vacuole du béton AC-1

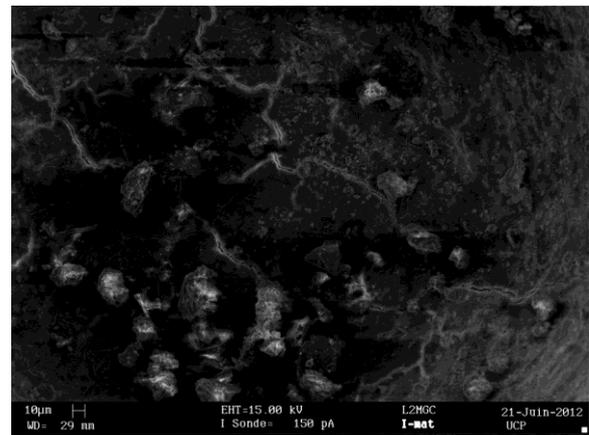


Figure III. 29. Vacuole zoomée du béton AC-1

L'observation au microscope électronique à balayage du béton AC-1 à 15 cycles révèle une présence normale de pelotes d'ettringite et de portlandite (Figures III. 30, zoomée dans la Figure III. 31). On peut donc conclure que le béton ne réagit pas de manière pathologique aux sulfates de sodium après 15 cycles du protocole immersion/séchage à 60°C..

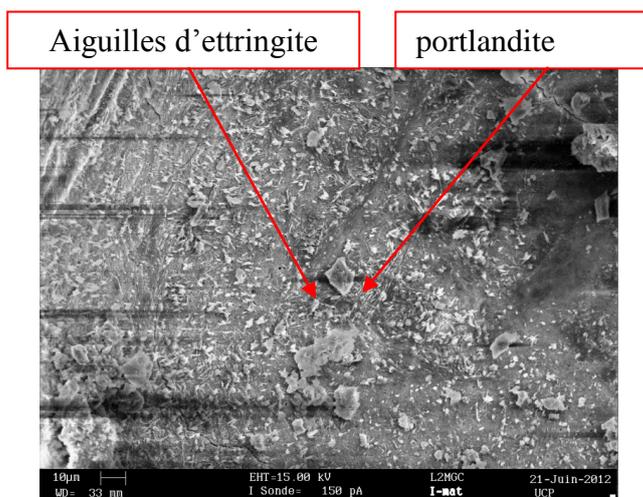


Figure III. 30. Vacuole du béton AC-1

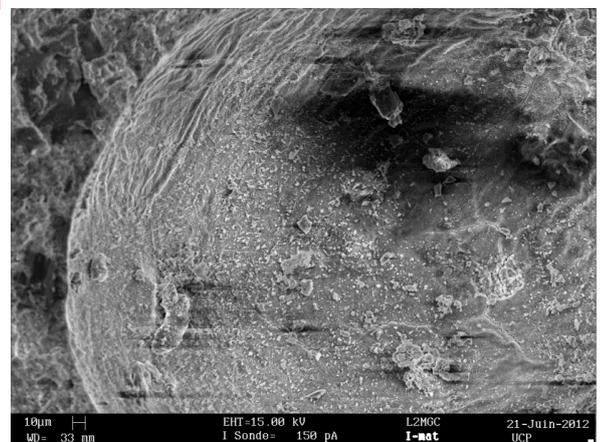


Figure III. 31. Vacuole zoomée du béton AC-1

B. 3. Béton PC

A 0 cycles, l'absence de l'ettringite en surface du béton renforcé de fibres de propylène PC en général et à l'interface fibres/pâte de ciment hydraté indique l'absence de l'ettringite primaire comme le montrent la Figure III. 32 zoomée en la Figure III. 33.

A 15 cycles, on observe la présence de l'ettringite et de la portlandite dans de nombreuses vacuoles (Figures III. 34. et III. 35) mais pas dans la pâte ou aux interfaces pâte/granat ce qui est cohérent avec une attaque sulfatique peu significative.

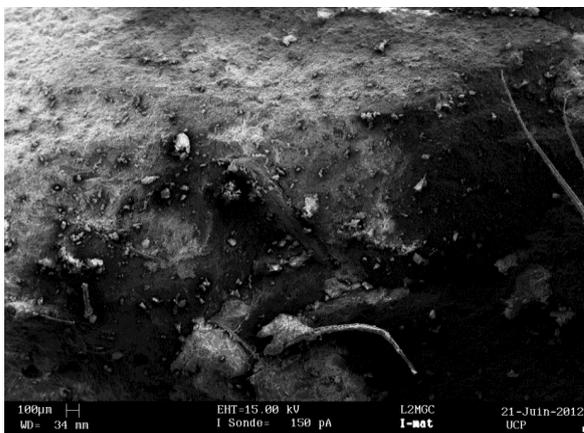


Figure III. 32. Surface du béton renforcé de fibres de polypropylène PC

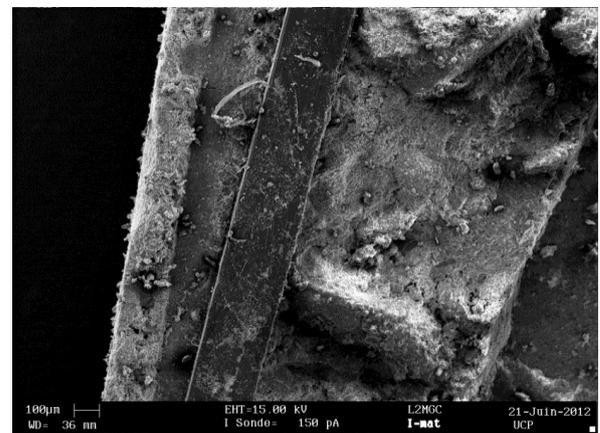


Figure III. 33. Zoom de l'interface fibres/pâte de ciment hydraté pour le PC

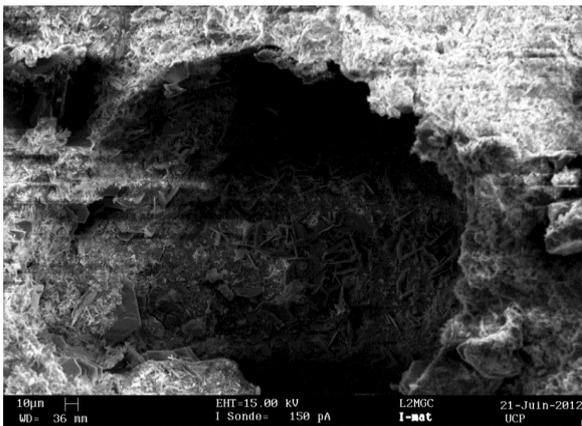


Figure 34. Vacuole du béton PC

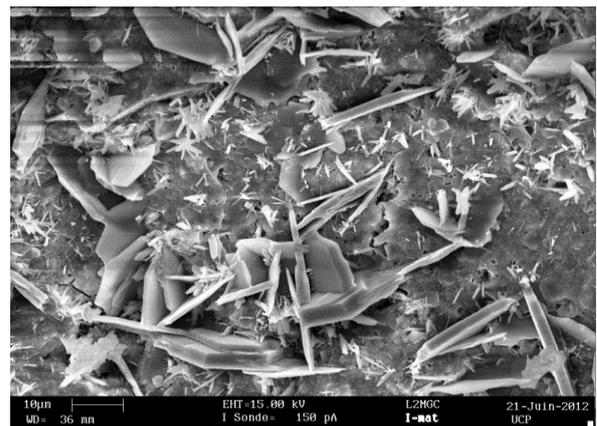


Figure III. 35. Vacuole du béton PC zoomée

Malheureusement pour nous, les échantillons écrasés à 45 jours n'ont pas été conservés par Oliver Tronel, ce qui nous amène à faire des conclusions sans les photos MEB à 45 jours.

II. 5. 3. Conclusion

1- Dans l'étude macroscopique, on remarque bien une évolution des bétons renforcés à 0.1% et 1% de fibres d'alfa accompagnée d'une importante dégradation. Les bétons renforcés à 1.5% d'alfa n'ont pas présenté de symptômes de dégradation et ni d'efflorescence causés par les sels. Les fibres semblent jouer un rôle d'absorption de la solution ce qui ne permet pas la cristallisation en surface.

2- Dans l'étude microscopique, à t_{15} on remarque l'absence de la formation de l'ettringite secondaire qui s'est formée très probablement à t_{45} et qui a causé la dégradation des AC-1 et AC-0.1. Pour les autres bétons, on ne remarque aucun signe d'attaque sulfatique externe ou de ruine causée par la formation éventuelle de l'ettringite.

3- En matière de perte de masse, l'ensemble des bétons suivent la même tendance de 0 à 5 jours, il y a gain de masse en cette période pour les cinq bétons. De 5 à 15 jours, deux groupes de bétons se forment, le AC-1, le AC-1.5 et le PC augmentent de masse et le AC-0.1 et le OC, très proches en composition en perdent. L'ensemble des bétons reprennent la même tendance, pratiquement une stabilisation de la masse de 15 à 45 jours. Sur cette dernière période, le AC-1 et le AC-1.5 sont pratiquement confondus.

4- On constate que tous les bétons ont la même tendance, c'est-à-dire que leur contrainte à la rupture augmente jusqu'à t_{15} , probablement du fait de la cristallisation des sels à l'intérieur des pores.

5- A t_{45} , seul le PC se détache du lot et augmente en résistance, les autres bétons se comportent d'une manière similaire avec une légère amélioration du AC-1%.

6- Le 1% semblerait être l'apport optimal en fibre d'alfa pour le renforcement des bétons de structure, il n'affecte pas énormément la contrainte de compression à la rupture.

III. Durabilité vis-à-vis aux sollicitations thermique

Au cours de l'échauffement du béton, plusieurs phénomènes physico-chimiques ainsi que des transformations modifiant la microstructure du composite apparaissent, ce qui a un effet sur les propriétés thermiques, hydriques et mécanique du béton. Plusieurs travaux de recherche ont présenté les transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire sous l'effet de

l'élévation de la température [29, 30, 31] ainsi que les différents paramètres favorisant l'instabilité thermique du béton (Chapitre I, Paragraphe III. 3. 3).

III. 1. Méthodologie et programme expérimental

3 éprouvettes cubiques de dimension 7x7x7 cm des différentes formulations de béton ont subi un cycle de trois phases pour chaque température. Une phase de chauffage à une vitesse de 1°C/mn jusqu'à la température T °C, une phase de stabilisation de 1 heure à la Température T °C constante, et enfin une troisième phase refroidissent à la même vitesse de 1°C/mn jusqu'à la température ambiante du laboratoire. La vitesse de 1°C/min est la plus utilisée dans le cas des dimensions de nos échantillons. Le four utilisé pour le chauffage est un four électrique programmable de dimension 1,3 x 1,04 x 1,04 m (Figure III. 36) dont la température peut atteindre les 1000°C. Il est piloté par un régulateur-programmateur EURO THERM connecté à un thermocouple placé sur la surface d'une éprouvette. Un ventilateur associé au chauffage permet de réguler et d'homogénéiser la température par la circulation d'air entre les résistances chauffantes. Pour l'acquisition des données de température, une centrale d'acquisition automatique HP323 est utilisée.



Figures III. 36. Four électrique programmable de dimension 1,3 x 1,04 x 1,04 m

Ces cycles de chauffage-refroidissement sont appliqués à nos échantillons de la température ambiante de 20°C à trois différents paliers de température; 170°C, 360°C et 610°C.

Le premier palier de 170°C a été choisi à la fin de l'élimination de l'eau libre à 150°C [30] et de la fusion du polypropylène à 170°C [32].

Le deuxième palier de 370°C représente la température de fusion de la fibre naturelle. Plusieurs chercheurs s'accordent sur le fait que pour les fibres non traitées, une perte de masse d'environ 90% est constatée entre 200 et 250°C [32, 33, 34]. Plusieurs études de la littérature montre que la dégradation de la cellulose se ferait entre 300 et 420°C et que les pectines et les hémicelluloses se dégraderaient entre 250 et 320°C [34, 35, 36, 37]. Quant-à la température de fusion de la lignine, un désaccord subsiste, d'où le consensus sur une large gamme de température qui varie entre 160 et 900° [37].

Dans cette partie, nous avons effectué en premier lieu l'analyse thermogravimétrique (ATG) et l'analyse thermique différentielle (ATD) de la fibre alfa pour déterminer les températures correspondantes aux modifications de la fibre en fonction de l'élévation de la température.

Nous nous sommes intéressés ensuite aux performances mécaniques des différents types de béton après chaque palier, à savoir les résistances à la compression.

Nous avons calculé les pertes de masses de trois types de bétons, le béton ordinaire et le béton renforcé de fibre de polypropylène comme bétons témoins et le béton renforcé de 1,5% de fibres d'alfa (AC-1.5) comme étant le béton de structure qui contient le plus de fibre d'alfa, pour apporter plus d'information sur l'influence de la température sur le comportement des bétons renforcés de fibres d'alfa.

Une étude au microscope à balayage (MEB) des différents bétons et à différentes température a été menée pour étudier l'aspect microstructural des différents bétons en fonction de la température.

III. 1. 1. Analyse thermographique de la fibre d'alfa

L'analyse thermogravimétrique (ATG), appelée "*thermogravimetric analysis* (TGA)" en anglais, est une technique d'analyse thermique qui permet de déterminer la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température.

Généralement, elle est accompagnée d'une analyse thermique différentielle (ATD), dite "*Differential Thermal Analysis* (DTA)" en anglais, qui est une technique d'analyse thermique

qui consiste à suivre l'évolution de la différence de température entre l'échantillon étudié et un corps témoin inerte.

Cette analyse est effectuée sous argon grâce à un appareil de TA Instrument TGA Q50 du laboratoire de physicochimie des polymères des interfaces de l'université de Cergy-Pontoise.

Les fibres ont été finement coupées et conservées dans un sac en plastique jusqu'au jour de l'analyse. La vitesse de chauffage est de 10°C/min de la température ambiante jusqu'à 800°C.

Dans notre cas on utilise l'analyse thermique comme une technique de caractérisation pour suivre les éventuelles modifications chimiques de la composition de nos fibres.

La Figure III. 37 permet d'identifier le phénomène de perte de masse et la de composition chimique de la fibre d'alfa sous analyse thermique (ATG et ATD).

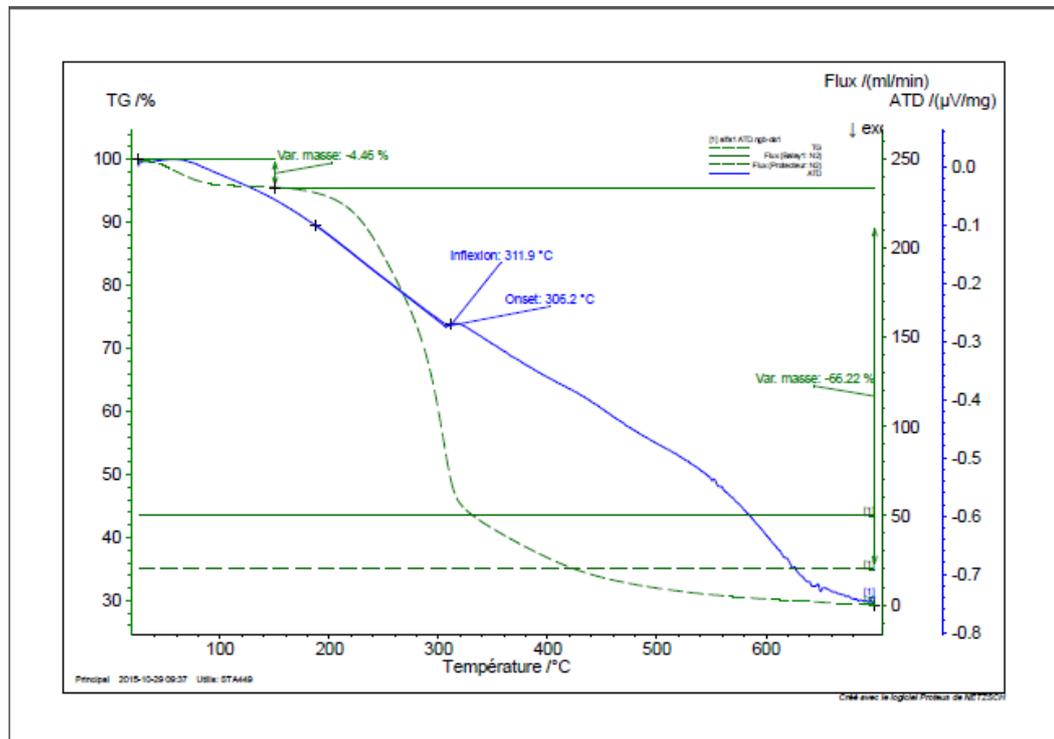


Figure III. 37. Analyse thermique (ATG/ATD) de la fibre d'alfa

On distingue :

Un premier palier de 10 à 200°C : généralement cette phase correspond à la perte d'eau absorbée, c'est à dire la déshydratation de la fibre, elle se produit entre 0 et 100°C et s'accompagne d'une perte de masse de 4,48%, après cette perte l'évolution est pratiquement nulle, c'est à dire que la masse varie peu à une température comprise entre 100 et 200°C. Cela signifie que les constituants de la fibre d'alfa sont pratiquement nuls dans cette plage de température d'où on a une bonne stabilité thermique.

Donc dans cette phase, selon l'ATD, on observe un pic exothermique correspondant à l'évaporation de l'eau (eau de structure) jusqu'à 100°C. Après 100°C et jusqu'à 200°C, on ne remarque aucune réaction exothermique ou endothermique ce qui indique que les fibres sont stables à ces températures.

Un deuxième palier de 200 à 425°C: entre 200 320°C on observe une perte de masse significative, cette plage de température correspond à des faits exothermiques liés à la composition de la fibre végétale anhydre, Ils sont présentés par des pics et des épaulements reliés à la décomposition de la fibre par polymérisation des hémicelluloses et des pectines. Selon Ouajai et Shanks [38], la décomposition des hémicelluloses ou des pectines à lieu entre 250 et 320°C, d'autres chercheurs comme Généau [39] ont montré que la dégradation des hémicelluloses et des pectines se dégradent entre 270 et 330°C.

La dégradation de l'hémicelluloses et des pectines est suivie par une perte de masse entre 320 et 425°C due à la décomposition de la cellulose, qui selon Ouajai et Shanks [10], se produit entre 390 et 400°C.

La perte de masse de notre fibre atteint les 66.45%, dans cette phase, ce qui est attribué à la dépolymérisation thermique des hémicelluloses, des pectines et de la cellulose.

Un troisième palier au delà de 425°C: situés à de très hautes températures, il se caractérise par la diminution de la vitesse de perte de masse et correspond à la dégradation thermique de la lignine et aux résidus résultants de la décomposition des principaux composants au cours de la deuxième phase, d'après Généau [11], la lignine se dégrade aux environs de 420°C.

III. 1. 2. Résistance à la compression simple

Après chaque élévation de la température, les échantillons de chaque type de béton sont testés à la compression simple.

Le Figure III. 38 représente les résistances de chaque type de béton en fonction des différents paliers de température.

Le béton ordinaire "OC" est le béton qui perd le plus de résistance, elle est de l'ordre de -40 MPa, suivi des bétons renforcés à 0,1 et à 1,5% de fibres d'alfa (AC-0.1 et AC-1.5) dont la perte de résistance est de l'ordre de -30 MPa et enfin celle du béton renforcé à 1% de fibres d'alfa occupe la dernière place avec une perte de résistance d'environ -20 MPa. Le béton renforcé aux fibres de polypropylène est entre les AC-0.1 et AC-1.5 et le AC-1.

Hormis, le béton au polypropylène, les bétons fibrés perdent tôt leurs résistances sous l'effet de l'élévation de la température. Le béton ordinaire reste stable jusqu'à 300°C avant une chute brutale de sa résistance.

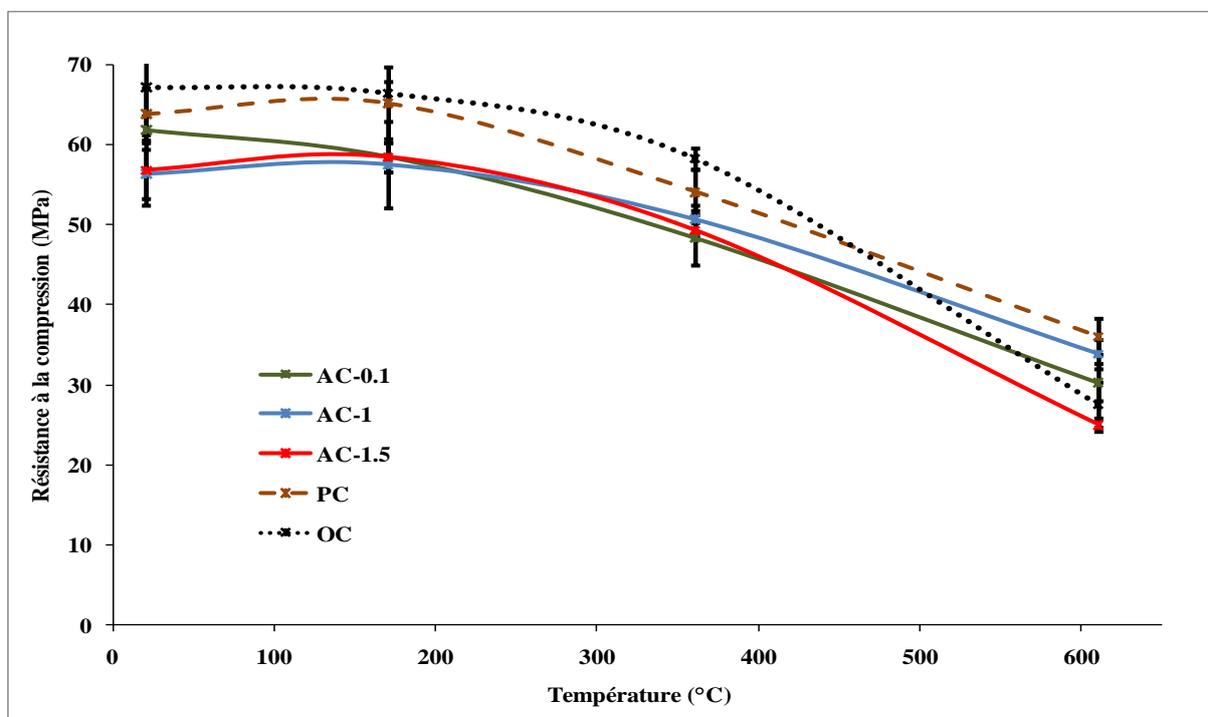
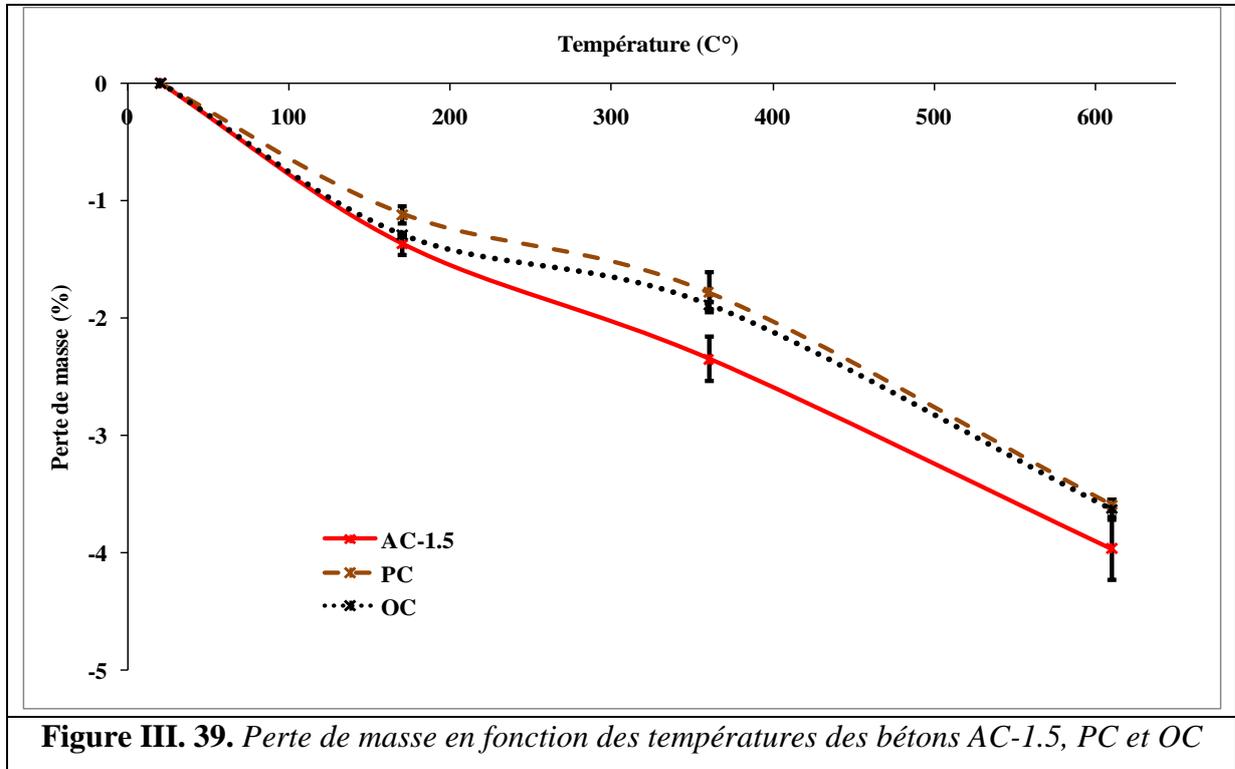


Figure III. 38. Résistance à la compression en fonction de la température

III. 1. 3. Perte de masse

La perte de masse en fonction de la température des bétons sélectionnés est donnée par la figure III. 39.



Les trois bétons suivent la même tendance, à savoir leurs pertes de masse se fait en trois paliers. Le PC et le OC paraissent similaires mais de pentes différentes.

Durant la première phase le OC et le AC-1.5 sont quasi similaires, leurs pertes de masse évoluent selon deux droites de même pente (Tableau 1). Celle du PC est moins importante. Cette phase correspond à l'évaporation de l'eau libre.

Durant la deuxième et la troisième phase les deux bétons témoins, soit le béton renforcé de fibres de polypropylène ou le béton ordinaire se comportent pratiquement de la même manière, ils évoluent selon deux droites de même pente et dont les valeurs sont très proches (Figure 4, Tableau1). Pour le béton renforcé de fibres d'alfa, nous avons l'impression que ces deux phases n'en constituent qu'une seule, leurs évolutions suivent deux droites de pentes très proches (Tableau III. 4). Leurs valeurs sont plus importantes du fait que l'alfa contient plus

d'eau et que cette dernière mets plus de temps pour s'évaporer. Ces deux phases correspondent à l'évaporation de l'eau liée.

Tableau III. 4. *Pente des droites Perte de masse en % = f(Température en °C)*

	Phase 01: 20°C - 170°C	Phase 02: 170°C - 360°C	Phase 03: 360°C - 610°C
AC-1.5	-0.009	-0.005	-0.006
PC	-0.007	-0.003	-0.007
OC	-0.009	-0.003	-0.007

III. 1. 4. Etude microscopique au MEB

L'étude au microscope à balayage (MEB) a été faite sur des échantillons de béton ordinaire OC, de béton renforcé de fibres de polypropylène PC et de béton renforcés à 1,5% de fibres d'alfa AC-1.5. Différentes températures ont été choisies, mais nous avons choisi la température ambiante et la température la plus élevés qui représentent l'état initial et l'état final et les différentes transformations des bétons fibrés.

A. Béton ordinaire OC

Pour les échantillons OC à température ambiante (Figure III. 40) les hydrates du béton comme les aiguilles d'ettringite et les CSH sont facilement observables. A 610°C, on constate une forte diminution de l'ettringite (Figure III. 41).

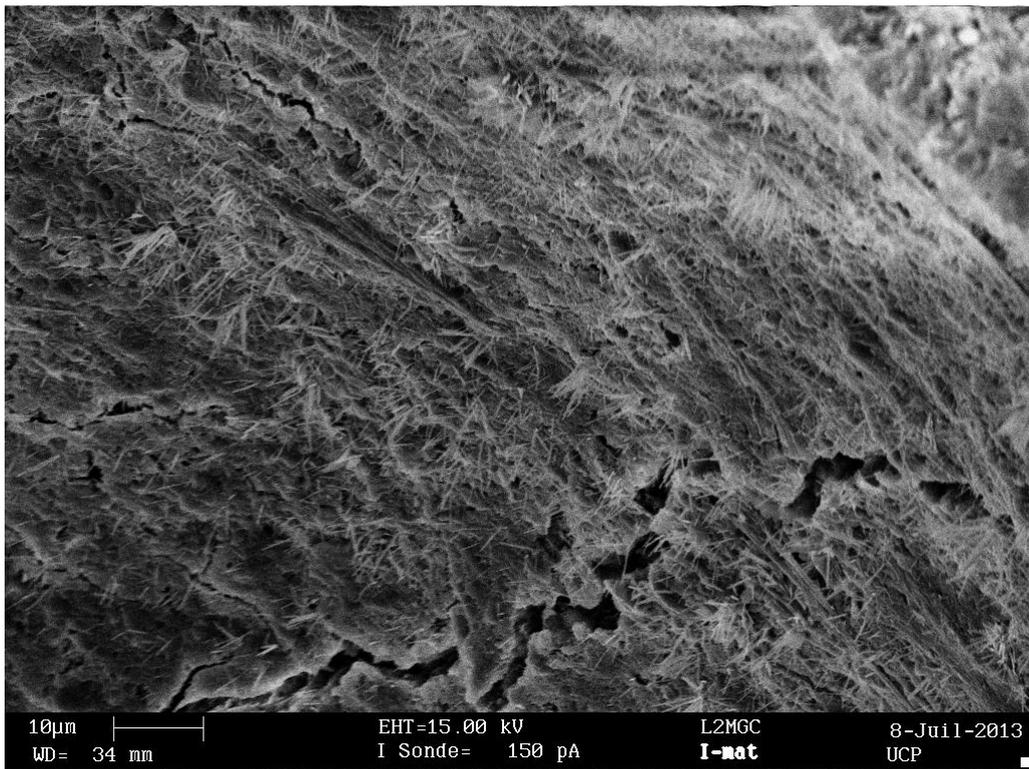


Figure III. 40. MEB de OC à température ambiante

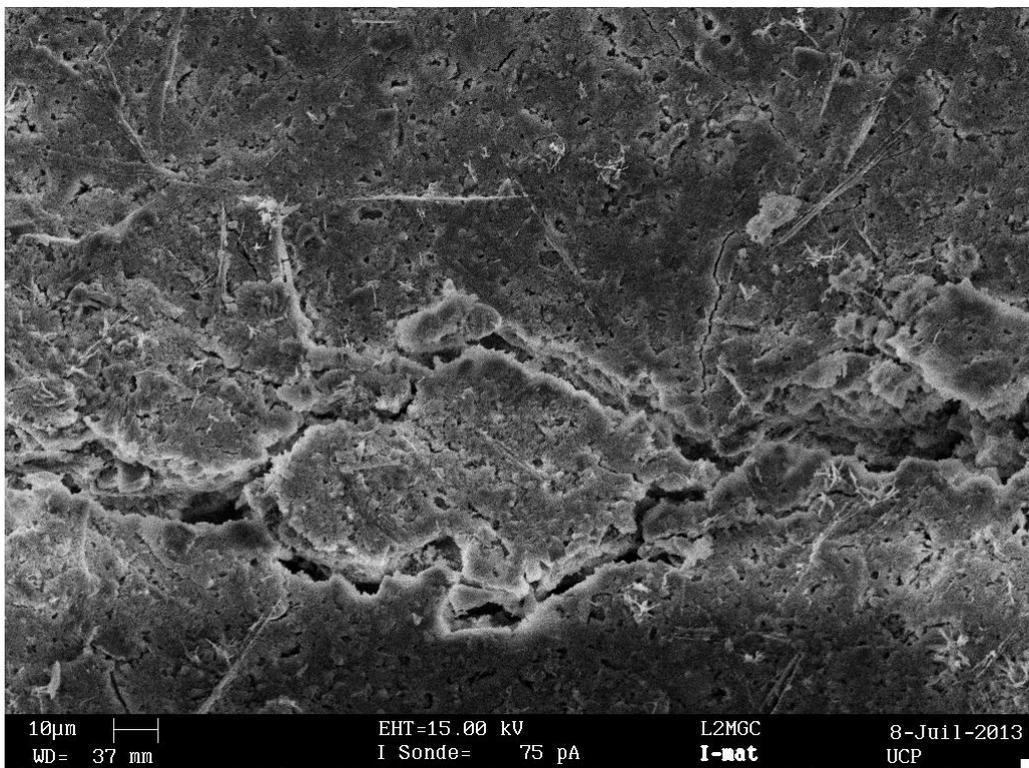


Figure III. 41. MEB de OC à 610°C

B. Béton renforcé de fibres de polypropylène PC

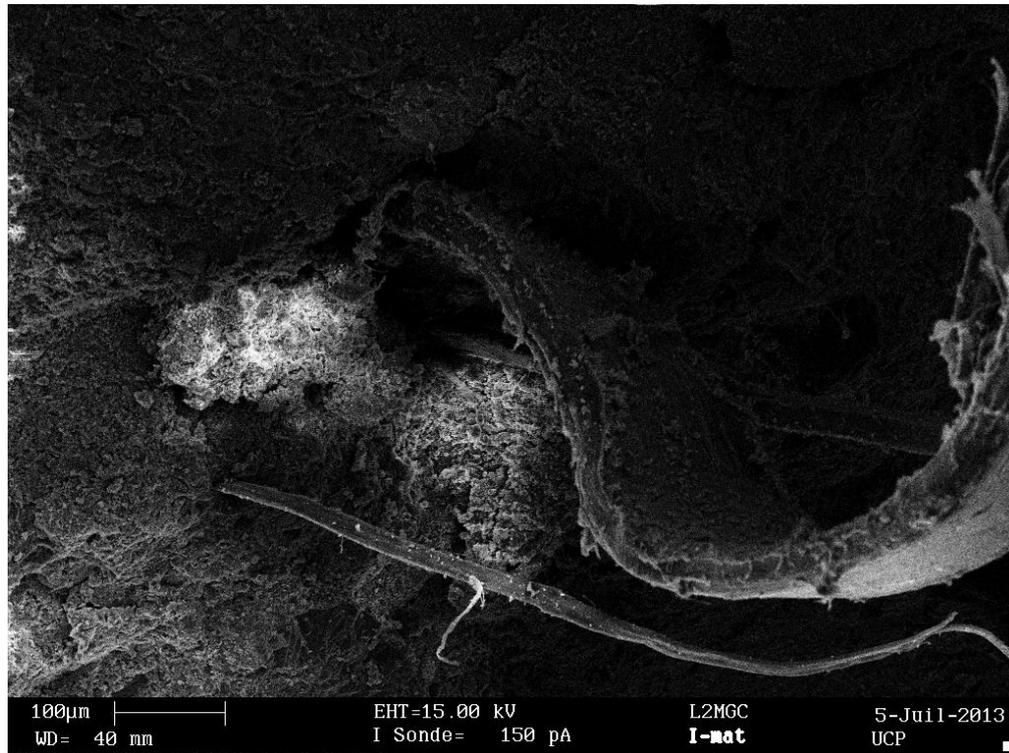


Figure III. 42. MEB du PC à température ambiante

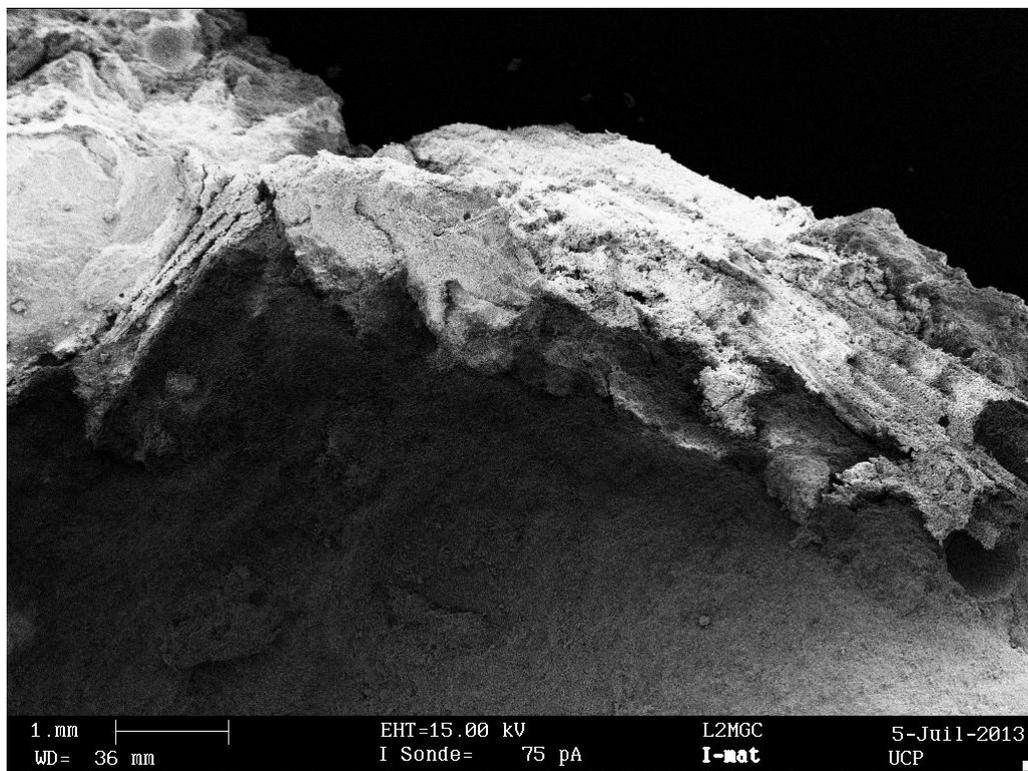


Figure III. 43. MEB de PC à 610°C

Pour les échantillons PC à température ambiante (Figure III. 42) on observe une fibre de Polypropylène dans une forme compacte alors qu'après un traitement thermique à 610°C (Figure III. 43), les fibres de polypropylènes semblent se désagrégées et poreuses.

A. Béton renforcés à 1.5% de fibres d'alfa AC-1.5

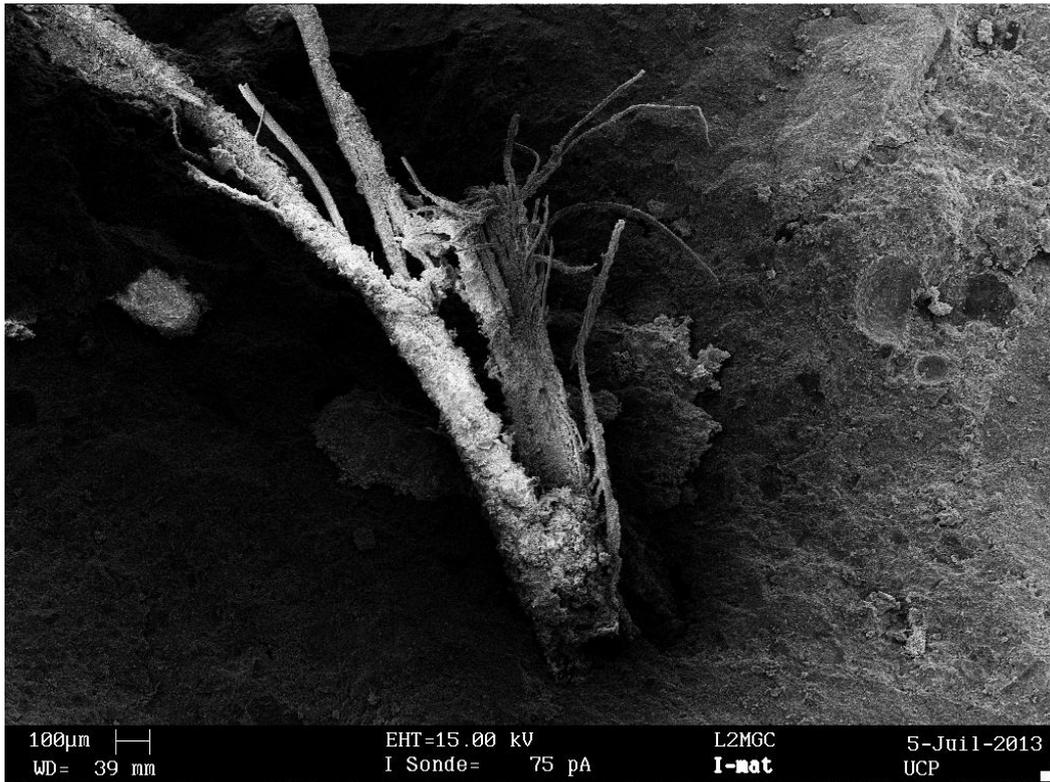


Figure III. 44. *MEB de AC-1.5 à température ambiante*

Pour les échantillons AC-1.5 à température ambiante (Figure III. 44) on observe une fibre d'alfa filamenteuse alors qu'après un traitement thermique à 610°C (Figure III. 45), les fibres d'alfa semblent être très compactes et très poreuses mais ne disparaissent pas.

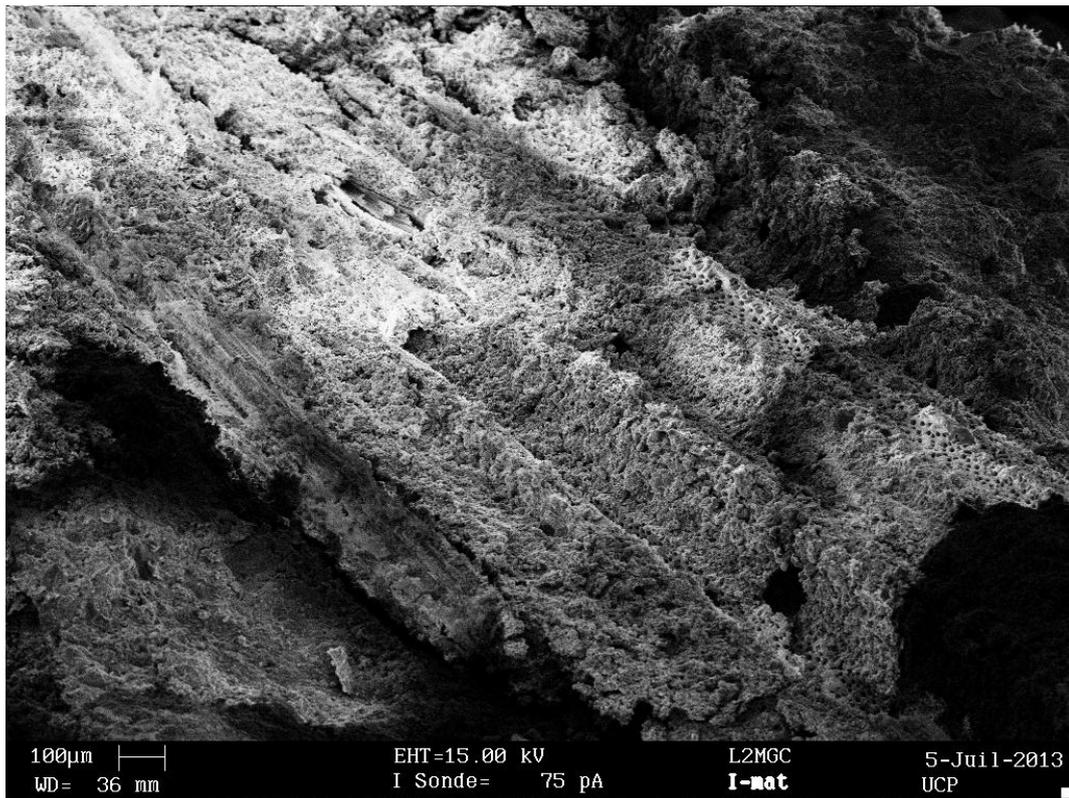


Figure III. 45. MEB du béton AC-1.5 à 610°C

III. 2. Conclusion

1- L'ATG montre l'existence de trois paliers de perte d'eau de la fibre d'alfa, un premier palier de 0 à 200°C qui correspond à une déshydratation lente de la fibre due au départ de l'eau adsorbée. Un deuxième palier de 200 à 450°C correspond à une perte de masse significative due à la dégradation des hémicelluloses et des pectines qui se dégradent entre 270 et 330°C. Et enfin un troisième palier (au delà de 450°C) qui se caractérise par le ralentissement de la perte de masse et qui correspond à la dégradation thermique de la lignine aux environs de 420°C et aux résidus résultants de la décomposition des principaux composants aux cours de la deuxième phase.

2- Le béton ordinaire "OC" est le béton qui perd le plus de résistance, elle est de l'ordre de - 40 MPa, suivi des bétons renforcés à 0,1 et à 1,5% de fibres d'alfa (AC-0.1 et AC-1.5) dont la perte de résistance est de l'ordre de -30 MPa et enfin celle du béton renforcé à 1% de fibres d'alfa occupe la dernière place avec une perte de résistance d'environ -20 MPa. Le béton renforcé aux fibres de polypropylène est entre les AC-0.1 et AC-1.5 et le AC-1. Hormis, le béton au polypropylène, les bétons fibrés perdent tôt leurs résistances sous l'effet de

l'élévation de la température. Le béton ordinaire reste stable jusqu'à 300°C avant une chute brutale de sa résistance.

3- Les bétons confectionnés subissent une perte globale de 3,5 à 4 % de masse. Elle se traduit par trois étapes ; une première perte rapide de 20 à 170 °C due au départ de l'eau libre, puis un ralentissement de perte de masse de 170 à 370°C, pratiquement pour la plupart des bétons sauf pour le AC-1.5 car c'est le béton qui contient le plus de fibres d'alfa, cette perte est due au départ de l'eau liée et enfin, une troisième (de 370 à 610°C) et dernière phase de perte de masse due au départ de l'eau liée restante.

4- Après l'analyse au MEB, on remarque que les échantillons OC à température ambiante, les hydrates du béton comme les aiguilles d'ettringite et les CSH sont facilement observables à température ambiante et une forte diminution de l'ettringite à 610°C. Pour les échantillons PC à température ambiante, on observe une fibre de Polypropylène dans une forme compacte alors qu'après un traitement thermique à 610°C, les fibres de polypropylènes semblent se désagrégées et poreuses. Quant-aux échantillons AC-1.5 à température ambiante on observe une fibre d'alfa filamenteuse alors qu'après un traitement thermique à 610°C, les fibres d'alfa semblent être très compactes et très poreuses.

IV. Références bibliographiques

- [1] Laffitte M., *Etude de la durabilité des bétons autoplaçants*, Projet de fin d'études 5ème Année Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, Mars 2008.
- [2] Dupas G., Mougeot D., Cali V., *Etude de la durabilité des BAP et des BHP soumis à des attaques extérieures*, Projet de fin d'études 5ème Année Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, juin 2008.
- [3] Khelifa M. R., Guessasma S., *New Computational Model Based on Finite Element Method to Quantify Damage Evolution Due to External Sulfate Attack on Self-Compacting Concretes*, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 28; pp. 260-272, 2013.
- [4] Khelifa M. R., *Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 2009.
- [5] Molez L., Bian H., Prince-Agbodjan W., *Résistance au gel/dégel des BFUHP : Compétition entre endommagement et cicatrisation*, XXX^e Rencontres de l'AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, 2012.

- [6] Nguyen L. H., *Béton de structure à propriétés d'isolation thermiques améliorées : Approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2013.
- [7] Xing Z., *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de doctorat en Génie Civil, 2011.
- [8] Collepari M., *A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete*, Cement and Concrete Composites, 25, pp. 401-407, 2003;
- [9] Brunetaud X., *Etude de l'influence des différents paramètres et leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton*, Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux, Ecole Centrale de Paris, 2005.
- [10] Pavoine A., *Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite*, Thèse de doctorat en Sciences des matériaux, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003
- [11] Leklou N., *Contribution à la connaissance de l'attaque sulfatique interne*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Toulouse, 2008.
- [12] khelifa M. R., Brunetaud X., Al-Mukhtar M., *Size effect of concrete samples on the kinetics of sulfate attack*, Cement and Concrete Composites, 34, pp. 370-376, 2012.
- [13] Rapport, *Hangar de Stockage Sidi Khelifa – Coopérative de céréales et légumes secs - Wilaya de Mila*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
- [14] Rapport, *Pont sur Oued Djeddi – Wilaya de Biskra*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
- [15] Rapport, *Station de traitement des eaux de Ain-Tinn – Wilaya de Mila*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2006.
- [16] Rapport préliminaire, *Glissement CW134 - Wilaya de Mila*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2006.
- [17] Rapport du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction, *Société de Gestion des Participations – Etudes et Engineering*, Unité de Batna (Algérie), Avril 2006.
- [18] Khelifa R., *L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta*, Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.

- [19] Rapport, *Constataion de la dégradation du béton de l'usine de fabrication des batteries de voitures Bouzghaya - Batna*, Service Environnement de la wilaya de Batna, 2008.
- [20] Carde C., *Pthologie : L'Ettringite*, Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, N°9, Mars / Avril 2007.
- [21] Li G., *Etude du phénomène de l'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfatés*, Thèse de doctorat en Structures et Matériaux, Ecole des Ponts et Chaussées, 1994.
- [22] Denecker M. F. C., Hebert R. N., Wassermann J., Dosseh G., Menendez G., Bourgès A., *Experimental study of the crystallization of sodium sulfate hydrates through temperature monitoring*, Environmental Earth Sciences, 72 (12), pp. 5089-5099, 2014.
- [23] Hebert R. N., *Pétrologie et interactions fluides - roches: des réservoirs géothermiques à l'altération des pierres du Patrimoine bâti et au comportement des bétons à Haute Température*, Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Cergy-Pontoise, 2013
- [24] Ghrici M., Kenai S., Meziane E., *Mechanical and durability properties of cement mortar with algeria, natural pozzolana*, Journal of Materials Science, 41 (21), pp. 6965-6972, 2006.
- [25] Ghrici M., Kenai S., Mansour M. S., Kadri E., *Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume*, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 5 (2), 349-354, 2006.
- [26] Kevin Beck, *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université d'Orléans, 2006
- [27] Brunetaud X., R., Divet L., Duragrin D., Damidot D., *Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation*, Materials and Structures, 40 (6), pp. 567-578, 2007.
- [28] Lane D. S. and Ozyildirim, *Evaluation of the potential for internal sulfate attack through adaptation of ASTM C 342 and the Duggan test*, Cement, Concrete and Aggregates; 21 (1), pp, 43-58, 1999.
- [29] Noumowé A., *Effet des hautes températures sur le béton (20 - 600 °C): Cas particulier du béton à hautes performances*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
- [30] Xing Z., *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.



- [31] Razafinjato R. N., *Comportement des bétons à haute température : influence de la nature du granulat*, Thèse de doctorat en génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2015.
- [32] Yermak N., *Comportements à hautes températures des bétons additionnés de fibres*, Thèse de doctorat en Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise, 2015.
- [33] Haiping Y., Rong Y., Haimping C, Dong H. L., Chuguang Z., *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*, Fuel 86, pp 1781-1788, 2007.
- [34] Maya Jacob J., Rajesh D. Anandjiwala., *Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites*, Polymer Composite, pp. 187-207, 2008.
- [35] Vi Vi D. T., *Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non*, Thèse de doctorat en Matériaux Polymères et Composites, Université de Grenoble et Université des Sciences de Hochiminh Ville, 2011.
- [36] Rong M. R., Zhang M. Q., Liu Y., Cheng Yang G., Han Min Zeng H. M., *The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites*; Composites Science and Technology 61, 1437-1447.
- [37] Das M., Chakraborty D., *Evaluation of Improvement of Physical and Mechanical Properties of Bamboo Fibers Due to Alkali Treatment*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 107, pp. 522–527, 2008.
- [38] Ouajai and Shanks R.A *Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments*. Polymer Degradation and Stability, 89, 327-335, 2005.
- [39] Généau. C, *Procédé d'élaboration d'agro matériau composite naturel par extrusion bivis et injection moulage de tourteau de tournesol*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, pp1-380, 2006.



Chapitre IV : Analyse environnementale des bétons fibrés : comparaison des impacts liés aux fibres d'alfa et de polypropylène.

Chapitre IV : Analyse environnementale des bétons fibrés : comparaison des impacts liés aux fibres d'alfa et de polypropylène.

Le béton est un matériau de construction extrêmement répandu partout dans le monde. Il est parfois renforcé de fibres afin de réduire la formation de fissures durant son séchage et sa vie en œuvre. Le polypropylène (PP) est produit à partir de pétrole et est fréquemment utilisé sous forme de fibres courtes. Même si elles sont présentes en faible quantité dans 1 m³ de béton, elles sont susceptibles d'avoir un impact non négligeable sur l'environnement si l'on considère la quantité de béton nécessaire pour construire une ville, une usine ou un barrage. Dans ce chapitre, le remplacement du polypropylène par des fibres d'alfa, graminée poussant spontanément autour du bassin méditerranéen est envisagé sur le plan environnemental. Une analyse de cycle de vie (ACV), effectuée à l'aide du logiciel Simapro, montre que l'utilisation de fibres végétales sauvages locales décroît considérablement les impacts environnementaux, en particulier l'émission de CO₂, gaz à effet de serre et l'appauvrissement des ressources fossiles. De ce fait, si l'utilisation des bétons fibrés ne peut être évitée, en particulier en zone sismique, l'utilisation de cette ressource locale peut apporter un bénéfice à l'environnement.

I. Introduction

Les opérations de construction sont parmi les activités humaine les plus impactantes pour l'environnement ainsi que montré par [1] et [2]. Parmi les matériaux de construction, le béton est le plus employé et sa consommation à l'échelle mondiale va de 1 tonne [3] à 3,8 tonnes [4] par personne et par an. Le béton est reconnu, dans la littérature, comme ayant un impact environnemental non négligeable [1] et [5]. C'est la raison pour laquelle des solutions alternatives sont recherchées, comme les bétons recyclés ou les « bétons verts », et leurs impacts environnementaux sont évalués [6], [7], [8]. L'abondante littérature récente sur le sujet montre combien qu'il est important de raisonner en termes de principe théorique avant d'arriver aux applications des bétons verts innovants en construction.

I. 1. Intérêt mécanique des fibres dans les bétons

Ainsi que vu au chapitre I, différents types de fibres peuvent être utilisés dans les bétons pour différentes raisons. Il est prouvé que l'addition de fibres dans un béton peut améliorer sa durabilité, sa résistance à la fatigue et peut éviter l'ouverture et la croissance des fissures et l'éclatement du béton [9], [10], [11], [12].

1. 1. 1. Fibres de polypropylène dans les bétons

Parmi les fibres synthétiques, les fibres de polypropylène (FPP) sont fréquemment utilisées dans les bétons. Leur intérêt particulier, comparé aux fibres métalliques, est leur ouvrabilité et leur stabilité chimique [9]. Les FPP dans les bétons sont également connues pour éviter l'éclatement lorsque les structures sont soumises à des températures élevées grâce à l'augmentation de porosité que leur fusion entraîne et la réduction de la pression de pores [12], [13]. Les FPP jouent également un rôle dans la réduction de la création de fissures susceptibles d'apparaître lors d'un chargement répétitif du béton à température ambiante [14] ou par corrosion due à l'altération météorique ou des attaques chimiques [15].

1. 1. 2. Fibres végétales dans le béton

De nombreuses fibres végétales sont testées pour renforcer le béton en remplacement de fibres synthétiques afin de trouver un équivalent plus favorable pour l'environnement et parfois à un coût plus avantageux. Elles peuvent être distinguées grâce à différents critères : i) économique, environnemental ou pour des questions de santé (en remplacement de l'amiante, pour économiser des matériaux non renouvelables, pour promouvoir l'utilisation de matériaux locaux, utiliser des déchets ou des matériaux recyclables), ii) l'utilisation comme granulats (béton de lin) ou comme fibres de renforcement (cette étude), iii) l'utilisation comme béton de remplissage (béton de chanvre) ou de structure (cette étude), iv) leur origine comme par exemple le sous-produit d'une récolte [16], des déchets industriels comme ceux de papeterie [17] et [18]. De nombreuses fibres végétales sont déjà testées telles que celles de noix de coco [19], pulpe de bois [20], lin [21] et [22], chanvre [22]. Sur les rives de la Méditerranée, le diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) a également déjà été testé [23]. La présente étude concerne l'alfa (*Stipa tenacissima*), une autre herbe appartenant, elle aussi, à la famille des Poacea. Les fibres d'alfa seront notées FA par la suite.

I. 2. Analyse environnementale

Plusieurs méthodes ont été développées pour modéliser l'action de l'homme sur l'environnement. Le Bilan Carbone® focalise sur un seul critère, l'émission des gaz à effet de serre (GES), trop restrictif pour notre but. L'empreinte écologique utilise une méthode parlante, pour permettre au grand public de comprendre l'utilisation des ressources (nombre de terrains de football, de planètes Terre, ...) et résulte ainsi, elle aussi, en un seul indicateur. De plus, elle n'est pas normalisée. La méthode « Material Input per Service Unit (MIPS) »

utilise également une représentation vivante et expressive avec son « sac à dos écologique » : pour un bien donné, tous les coûts écologiques cachés sont calculés et montrés visuellement. Le problème de cette méthode est qu'elle quantifie les intrants mais pas les rejets et ne considère pas les transferts d'impacts. L'Analyse Multicritère est une aide à la décision pour des problèmes complexes incluant des contradictions. De ce fait, on peut lui reprocher son hétérogénéité et sa subjectivité. L'Analyse Coûts/bénéfices est utilisée principalement pour les politiques publiques et est basée sur la monétarisation. Elle n'a pas de cadre méthodologique et résulte en un seul indicateur. Pour cette étude, nous avons donc choisi une autre méthode, ne présentant pas ces inconvénients, appelée Analyse de Cycle de Vie (ACV). Cette méthode est fréquemment utilisée dans la bibliographie pour quantifier les impacts environnementaux de la production de béton ou de produits en béton [1] car elle peut évaluer plusieurs indicateurs importants. Ses caractéristiques seront développées dans la partie Matériel et Méthodes.

I. 3. But de l'étude

Cette étude des impacts environnementaux a été menée afin de compléter celle sur les propriétés mécaniques et de durabilité des deux types de bétons renforcés par des fibres : ceux à FPP et ceux renfermant des FA [24]. Comme le béton est exactement le même pour les deux fibres, nous avons choisi de comparer uniquement les fibres utilisées pour son renforcement.

II. Matériaux et méthodes

II. 1. Matériaux

Les matériaux nécessaires pour cette étude comprennent i) le béton lui-même, identique quelles que soient les fibres et ii) deux fibres de renforcement : les FPP et les FA.

II. 1. 1. Béton

La composition du béton utilisé dans cette étude est donnée par le Tableau IV. 1 (identique au Tableau II. 3, voir chapitre II pour explications des « mix code ») :

Tableau IV. 1. Proportions du mélange pour $1m^3$ et valeurs de l'affaissement des différents bétons.

Mix proportions for $1m^3$	Mix code						
	OC	AC-0.1	AC-1	AC-1.5	AC-2	AC-2.5	PC
Cement (kg)	350	350	350	350	350	350	350
Water (l)	168	168	168	168	168	168	168
Sand (kg)	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8	867.8
Coarse 4-12 (kg)	432	432	432	432	432	432	432
Coarse 12-20 (kg)	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2	561.2
Wet alfa fibers (kg)	0	0.3	8.4	12.7	16.9	21.1	0
Polypropylene fibers (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0
Superplasticizer (g)	280	190	280	280	280	420.8	190
Slump (mm)	130	140	110	60	60	60	120
Standard class NFP 18-451	S3	S3	S3	S2	S2	S2	S3
	Very plastic	Very plastic	Very plastic	Plastic	Plastic	Plastic	Very plastic

II. 1. 2. Fibres de polypropylène

Les FPP utilisées dans cette étude sont des fibres fabriquées à partir de propylène vierge (fiche technique en annexe 1). Elles sont de marque "EURO320DC". Elles ont été décrites au chapitre II (paragraphe II. 2. 2. 3). Elles sont utilisées à raison de 100g pour un sac de 35 kg de ciment et donc d'1kg par m^3 de béton dosé à 350 kg de ciment.

II. 1. 3. Fibres d'alfa

Les feuilles d'alfa que nous avons utilisées proviennent des hauts plateaux de la ville de Djelfa, située à 290 km au sud d'Alger. Toutes les informations nécessaires concernant cette fibre ont été fournies au chapitre II (paragraphe II. 2. 2. 2). Pour mémoire, l'alfa est une barrière contre l'avancée de la désertification (Figure IV. 1 - A) dans le Maghreb [26] et se présente sous forme de touffes d'environ 1 m de hauteur (Figure IV. 1 -B).

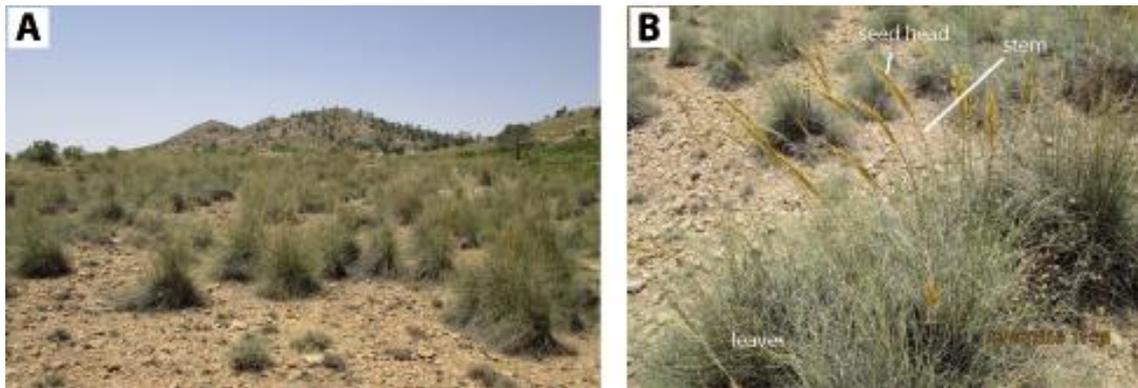


Figure IV. 1. *A - Champs d'Alfa sur les hauts plateaux algériens aux alentours de la ville de Djelfa. B - Touffe d'Alfa dont la hauteur est d'environ 1m.*

II. 2. Méthode

II. 2. 1. Analyse de cycle de vie (ACV)

l'ACV a pour but l'analyse des impacts environnementaux d'un produit ou un service au travers de son cycle de vie (Figure IV. 2). Tous les impacts sont concernés, avec un grand nombre d'indicateurs et toutes les étapes de la vie du produit sont également considérées. Cette méthode holistique permet d'éviter les transferts d'impacts. Cette méthode est quantitative ce qui permet les comparaisons et est reconnue internationalement grâce aux normes ISO 14040 et 14044.

L'utilisation de l'ACV implique plusieurs points. Une unité fonctionnelle doit tout d'abord être définie : c'est une base de comparaison pour des produits et matériaux qui ont des fonctions similaires. L'unité fonctionnelle pour cette étude est définie dans la section II.3. La modélisation a été effectuée avec le logiciel d'ACV SimaPro, le plus utilisé dans le monde. La version utilisée est SimaPro v8.0.3.14 ainsi que la base de données Ecoinvent 3.



Figure IV. 2. Évaluation des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie (Solidworks.com)

Une ACV est constituée de 4 parties (Figure IV. 3) :

- « Goal and scope », dans lequel le but et les lignes principales de l'étude sont définis ainsi que les choix principaux et les différents attendus (qualité des données par exemple)
- « Inventaire de cycle de vie » (ICV) où tous les flux entrants dans le système et en sortant (flux économiques : énergie, services) et les flux élémentaires (échanges avec la nature) sont définis. Les résultats d'ICV sont des émissions (par exemple de gaz à effet de serre).
- Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)
- Interprétation des résultats de l'EICV.

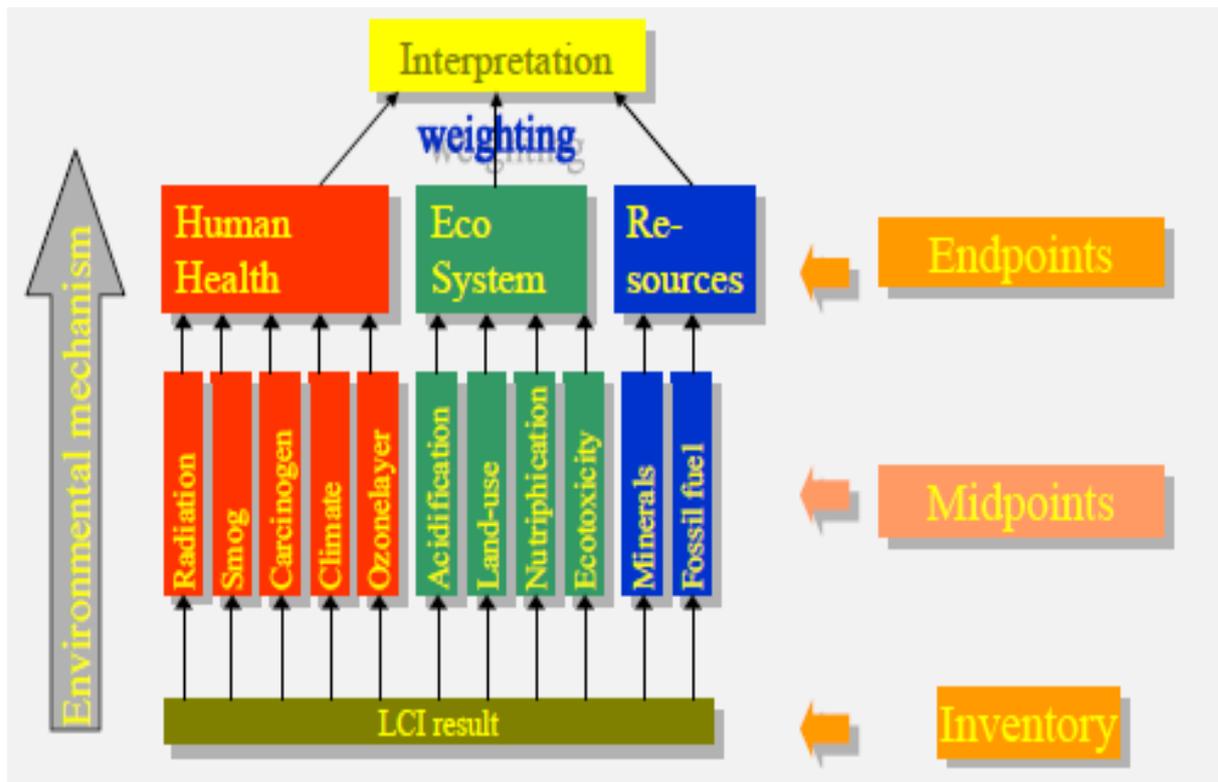


Figure IV. 3. Etapes constituant une ACV (SimaPro 7, introduction into LCA p 27)

II. 2. 2. ReCiPe

Pour l'étape EICV, nous avons choisi la méthode ReCiPe qui agrège en une liste limitée d'impacts les nombreux résultats de l'ICV. ReCiPe compte 18 indicateurs « midpoint » qui sont orientés problème et groupés en 3 indicateurs « endpoint » orientés dommage (santé humaine, écosystèmes, ressources). La déplétion de la couche d'ozone, l'oxydation photochimique, l'émission de particules atmosphériques, les radiations ionisantes et la toxicité humaine appartiennent à la catégorie « endpoint » dédiée à la santé humaine. L'acidification terrestre, l'eutrophisation des eaux douces et marines, l'écotoxicité terrestre ainsi que celle des eaux douces et marines, l'occupation des terres urbaines et agricoles et la transformation des terres naturelles appartiennent aux « écosystèmes ». Le changement climatique appartient à la fois à la santé humaine et aux écosystèmes. La déplétion de l'eau, des métaux et des énergies fossiles appartient à la catégorie « endpoint » orientée ressources. L'utilisateur choisit les « midpoints » et « endpoints » en fonction de la spécialisation, du degré de certitude et de la compréhension du sujet souhaitée. Dans cette étude, les résultats sont présentés en « endpoints ».

II. 3. Unité fonctionnelle et limites du système

Pour l'unité fonctionnelle, nous avons choisi de travailler en iso-performance et non iso-poids car ce qui compte en construction est la quantité de matériau de construction utilisée et non la quantité de fibres mise en œuvre. Ainsi, l'unité fonctionnelle retenue est « renforcer par des fibres 1 m³ de béton ordinaire », c'est à dire 1 kg de FPP (soit 0,1% de FPP en masse) équivalent, d'un point de vue mécanique, à 10kg de FA (soit 1% de FA en masse). En effet, plusieurs proportions d'alfa ont été testées lors d'essais mécaniques et 1% de FA s'est avéré être la proportion permettant d'atteindre les meilleures performances mécaniques. Pour cette étude, nous avons considéré 5 % de pertes durant le procédé industriel.

Pour les limites du système, nous avons focalisé sur les étapes d'extraction, de fabrication et de transport car les autres phases (utilisation et fin de vie) sont de loin les moins impactantes dans le cas de l'utilisation de béton pour la construction.

II. 4. Hypothèses et choix pour l'ICV

Plusieurs hypothèses doivent être avancées afin de compléter les données manquantes relatives aux champs de la production, du traitement et du stockage pour l'alfa ainsi que du transport pour les 2 types de fibres.

II. 4. 1. Alfa

II. 4. 1. 1. La plante elle-même: L'alfa n'existe ni dans Simapro ni dans ReCiPe. Nous avons donc dû la modéliser. Nous avons gardé le stockage de CO₂ commun à toutes les plantes car elles le captent dans l'atmosphère, mais nous avons éliminé les impacts liés à l'utilisation d'eau d'irrigation, de pesticides relatifs aux plantes cultivées. Après plusieurs tests, nous avons choisi « paille de blé, sur le champ » comme étant le plus proche de l'alfa. Ce choix entraîne une imprécision, le blé étant cultivé alors que l'alfa pousse spontanément.

II. 4. 1. 2. Récolte de l'alfa: comme l'alfa est traditionnellement récolté à la main, nous n'avons pas modélisé de récolte mécanique. Un tel mode a été testé dans le passé pour la production de pâte à papier, mais cela empêchait une bonne régénération de la plante.

II. 4. 1. 3. Stockage de l'alfa: l'alfa ne peut pas être récolté tout au long de l'année. C'est déconseillé de mars à juin pour permettre la régénération des plantes [27]. Il doit alors être

stocké pour une utilisation tout au long de l'année, mais il n'est pas nécessaire de construire de hangar car l'alfa peut être stocké dehors quelles que soient les conditions météorologiques, tout en gardant ses propriétés mécaniques.

II. 4. 1. 4. Préparation de l'alfa: l'alfa doit être coupé puis trempé dans de l'eau (afin d'éviter l'absorption de l'eau de gâchage du béton) et partiellement égoutté sur une table vibrante. Comme cette étude est un « prototype », nous avons dû extrapoler des données expérimentales à des données industrielles. Pour couper l'alfa en tronçons de 2-3 cm, nous avons utilisé les données relatives aux plus petites moissonneuses disponibles dans la base de données, c'est à dire 110 CV et 0,64 MJ. Nous considérons que la table vibrante pour égoutter l'eau a la même puissance : 0,64 MJ.

II. 4. 1. 5. Transport de l'alfa: les ânes étant de moins en moins utilisés pour le transport, nous avons considéré que l'alfa est transporté par des véhicules similaires à des pick-ups. Nous avons choisi la référence « < 10t 1990 » correspondant à des véhicules de transport récents de petite taille.

II. 4. 2. Transport du polypropylène (PP)

Les données relatives aux étapes d'extraction et transformation du pétrole nécessaires pour fabriquer le PP brut et les FPP peuvent être trouvées avec Simapro. Pour le transport, nous avons considéré que le PP et les FPP sont produits dans la même usine. Il existe quelques producteurs de fibres en Algérie, mais la plupart des fibres sont importées de France ou de Belgique. Nous avons considéré le plus grand producteur de fibres français (société Total) et ses deux sites principaux de production de FPP : Lavera (Sud de la France, près de Marseille) avec 140 000 t/an et Feluy (Belgique) avec 930 000 t/An. Le transport se fait exclusivement par la route jusqu'au port de Marseille. Il est négligeable pour la production sur le site de Lavéra (41 km de Marseille) ; pour Feluy (980 km de Marseille), nous avons pris des camions de 24 tonnes. Pour la traversée de la Méditerranée, de Marseille à Alger (environ 800 km), nous avons pris les données fournies par SimaPro pour les bateaux. Le transport interne à l'Algérie est envisagé par petits camions (7,5 t) et nous estimons que la distance moyenne est de 300km, correspondant à la distance entre Alger et les lieux d'emploi des fibres dans les villes où des chantiers de construction sont présents. Dans la présente étude, il apparaît que l'extraction du matériau brut nécessaire à la production des fibres (pétrole) est plus impactant

que le procédé industriel mis en œuvre pour les produire. Et pourtant, d'après la bibliographie ([28] à [31]), le procédé industriel est lui-même très impactant, montant par là-même le poids du transport.

III. Résultats

III. 1. Analyse comparative et interprétation

Dans la suite, les résultats vont être présentés sous la forme d'histogrammes dans lesquels l'axe des abscisses montre les différents impacts environnementaux, tandis que l'axe des ordonnées représente la quantification de ces impacts. Un point particulier sera effectué pour les émissions de CO₂.

III. 1. 1. Caractérisation

Dans cette partie incontournable d'une ACV, les résultats de LCI sont regroupés sous forme de catégories d'impacts, tels que « changement climatique », en utilisant des facteurs multiplicatifs tels que 1 pour le CO₂ et 25 pour le CH₄, suivant leur durée de vie dans l'atmosphère et donc la sévérité de leur impact (le CH₄ est en effet 25 fois plus impactant que le CO₂).

Ainsi que le montre la Figure IV. 4, le facteur le plus impactant pour le PP est l'extraction du matériau brut (la matière première; pétrole), particulièrement sur l'eutrophisation des eaux douces (probablement à cause de l'eau injectée dans les forages et rejetée en milieu naturel de surface), sur les radiations ionisantes (du fait de l'utilisation d'électricité) et bien sûr la déplétion des ressources fossiles. L'écotoxicité marine est évidente avec les marées noires et les effluents des quelques 20 000 plateformes pétrolières marines dans le monde, ainsi que les pratiques de dégazage des 8 000 pétroliers navigant à l'heure actuelle. L'acidification terrestre est liée aux nombreuses fuites sur les canalisations de transport du pétrole. L'impact suivant par ordre d'importance est le transport du pétrole brut. Les impacts liés au procédé industriel de production de FPP sont négligeables en comparaison avec les précédents, sans doute du fait des faibles conditions de température (60 à 80 °C) et de pression nécessaires à leur production et donc des faibles consommations énergétiques.

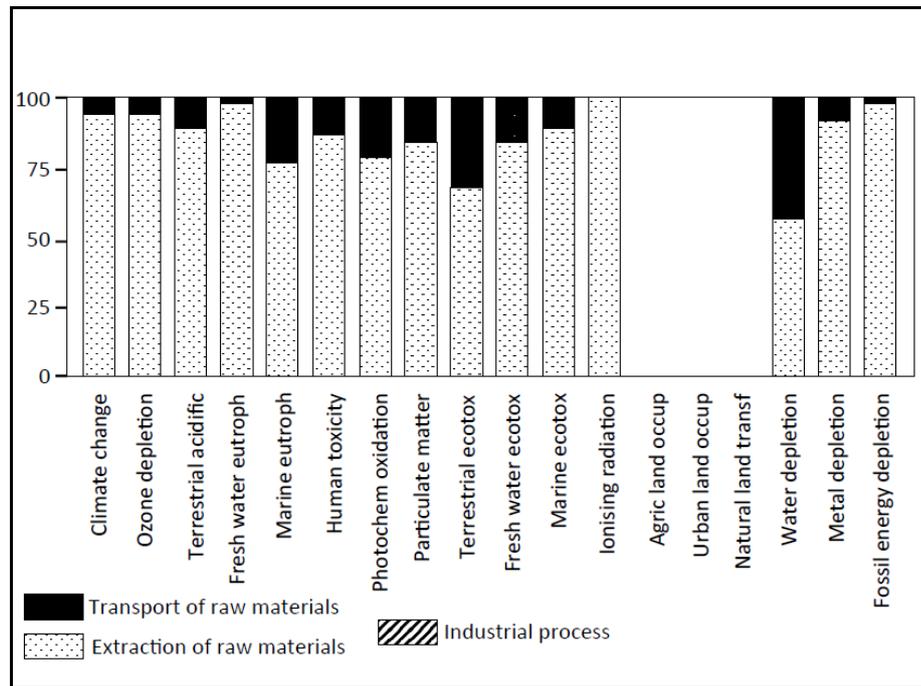


Figure IV. 4. Caractérisation des impacts des fibres PP produites en Belgique.

Pour l'alfa (Figure IV. 5), le transport du matériau brut est évidemment le phénomène le plus impactant (puisque la plante elle-même génère très peu d'impacts). Le procédé industriel génère également des impacts du fait des choix qui ont dû être opérés dans SimaPro, puisque nous avons modélisé l'alfa à partir des données disponibles pour le blé. Certaines caractéristiques du blé relatives à l'occupation des sols ressortent ainsi de cette étude.

Lorsque les deux types de fibres sont comparés (FA et FPP, Figure VI. 6), nous constatons que le bénéfice de l'alfa pour le changement climatique contrebalance largement ses impacts (avec, en plus, les réserves émises sur l'occupation des sols qui est artificiellement augmentée du fait de la modélisation de l'alfa à partir des données relatives au blé, disponibles dans SimaPro).

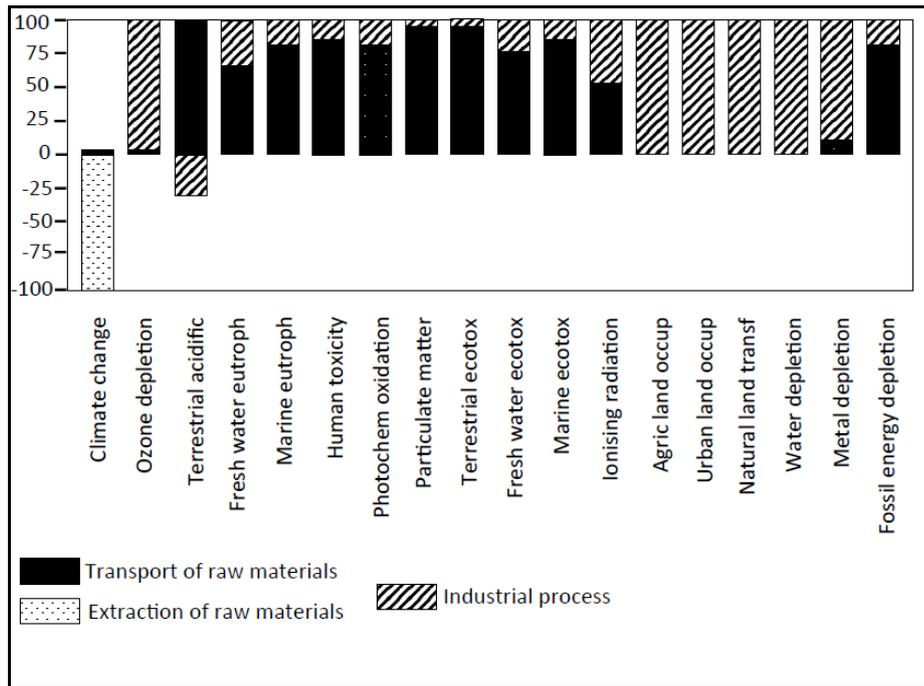


Figure IV. 5. Caractérisation des impacts des fibres alfa produites en Algérie.

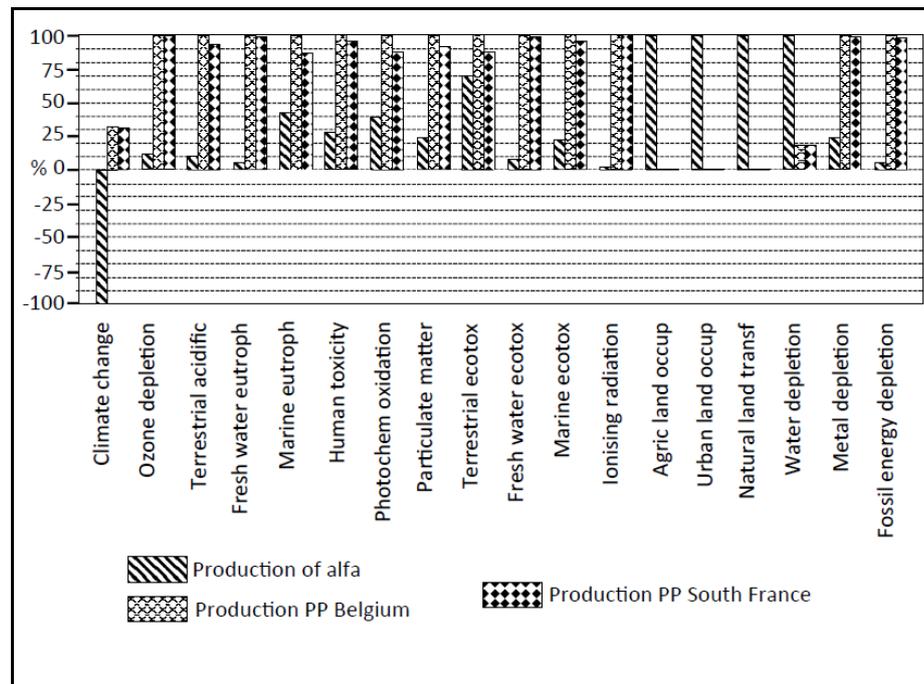


Figure IV. 6. Comparaison des impacts de caractérisation pour l'alfa et des fibres de polypropylène FPP : Belgique et Marseille.

Le transport est donc le facteur le plus impactant et tout processus industriel génère des impacts dus aux hypothèses faites avec Simapro dans lequel le blé a été utilisé pour modéliser l'alfa.

III. 1. 2. Normalisation

Cette étape permet de quantifier l'importance relative de chaque impact sur l'environnement. Pour le PP (Figure IV. 7), la déplétion en énergie fossile est de loin la plus importante. Pour l'alfa (Figure IV. 8), les bénéfices liés à l'absorption de CO₂ durant sa croissance contrebalancent largement les impacts négatifs. Les impacts de la production d'alfa brut pour l'occupation des terres agricoles et urbaines et leur transformation sont artificiellement augmentés par les données sur la production du blé, alors que l'alfa croît spontanément (sans eau ni amendements) dans des zones qui ne sont pas utilisées pour des cultures ou d'autres usages.

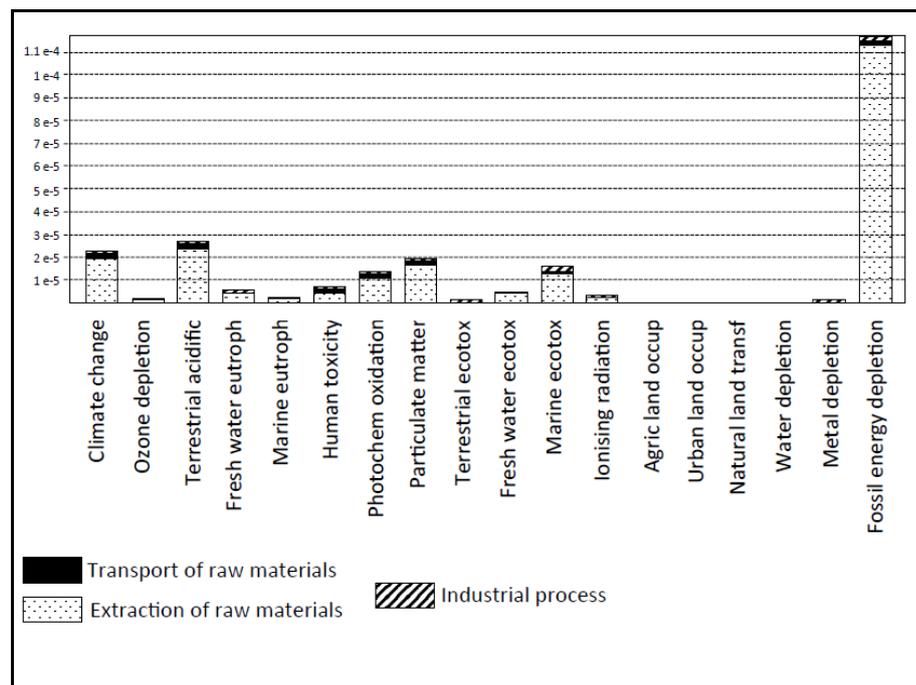


Figure IV. 7. Normalisation des impacts des fibres de polypropylène produites en Belgique.

La comparaison des deux types de fibres présentée sur la Figure IV. 9 montre que les impacts de l'alfa sont négligeables en comparaison de ceux du PP et que les FA présentent un bénéfice important sur le changement climatique par rapport aux FPP.

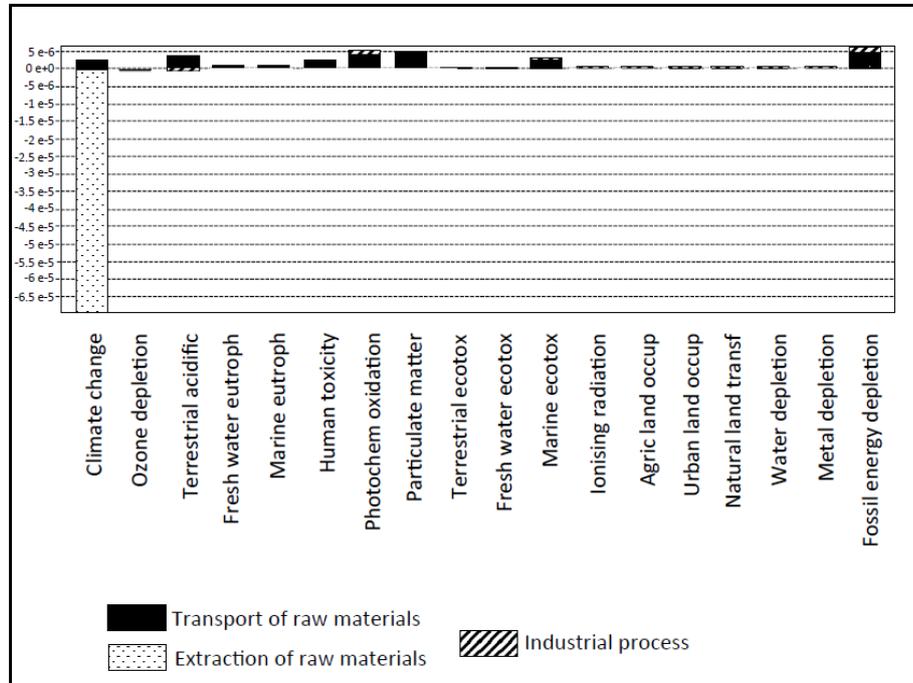


Figure IV. 8. Normalisation des impacts des FA produites en Algérie.

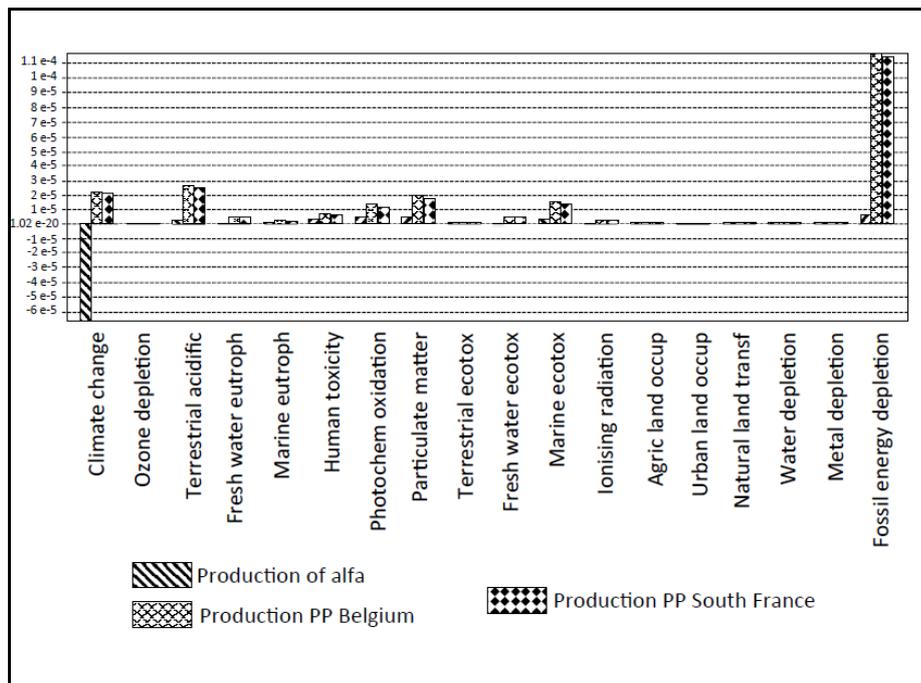


Figure IV. 9. Comparaison des impacts normalisés des fibres de polypropylène et de l'alfa.

III. 1. 3. Production de CO₂

La Figure IV. 10 montre que la consommation de CO₂, exprimée par une valeur négative liée à la production d'alfa est due à l'absorption de CO₂ durant la croissance des plantes. Le transport et le traitement de l'alfa, au contraire, produisent du CO₂, mais en faible quantité comparée à son absorption. En conséquence, le bilan à valeur négative montre que l'utilisation d'alfa pour le renforcement des bétons est bénéfique pour l'environnement du fait de la consommation de carbone atmosphérique. La figure IV. 11 montre que la production du PP est à l'origine d'émission de CO₂. La Figure IV. 12 indique aussi que la production de PP émet du CO₂ pour l'extraction et le transport du pétrole brut à partir duquel il est fabriqué. Le résultat est donc une valeur positive, montrant l'impact environnemental du PP sur le changement climatique, même si le procédé industriel de production du PP est, relativement, négligeable.

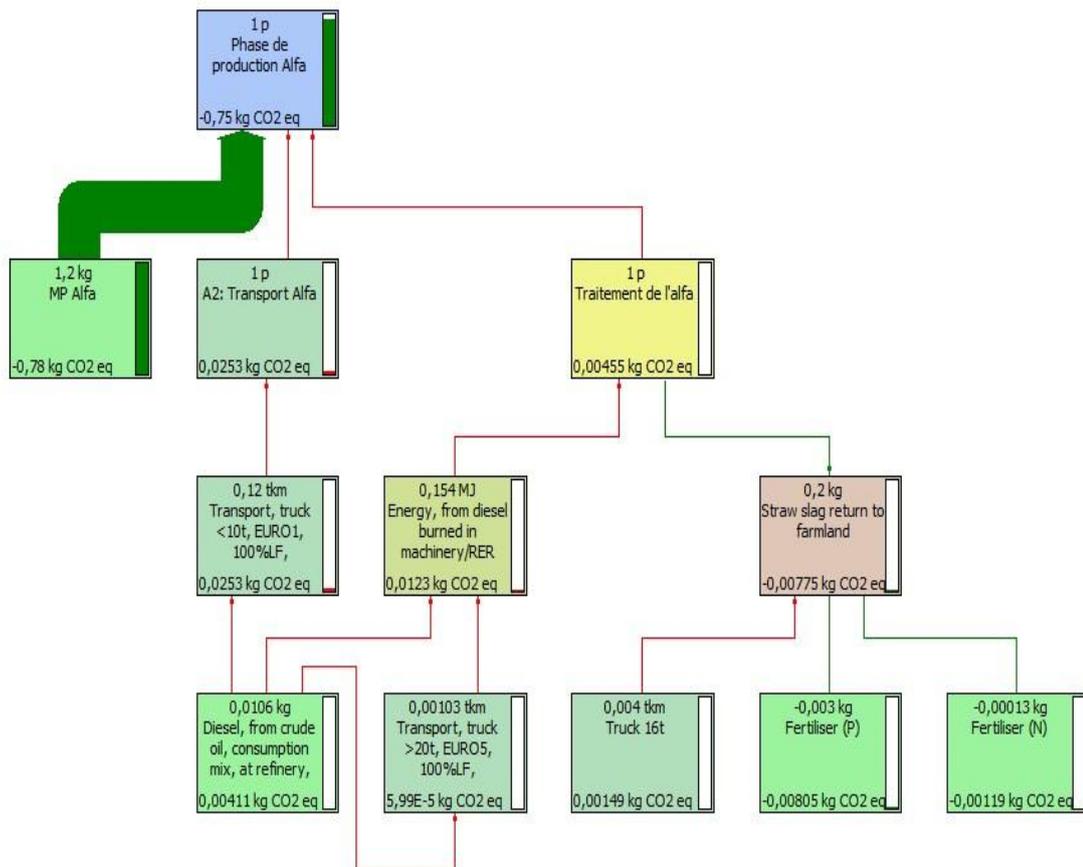


Figure IV. 10. Emission négative de CO₂ lors de la production de l'alfa.

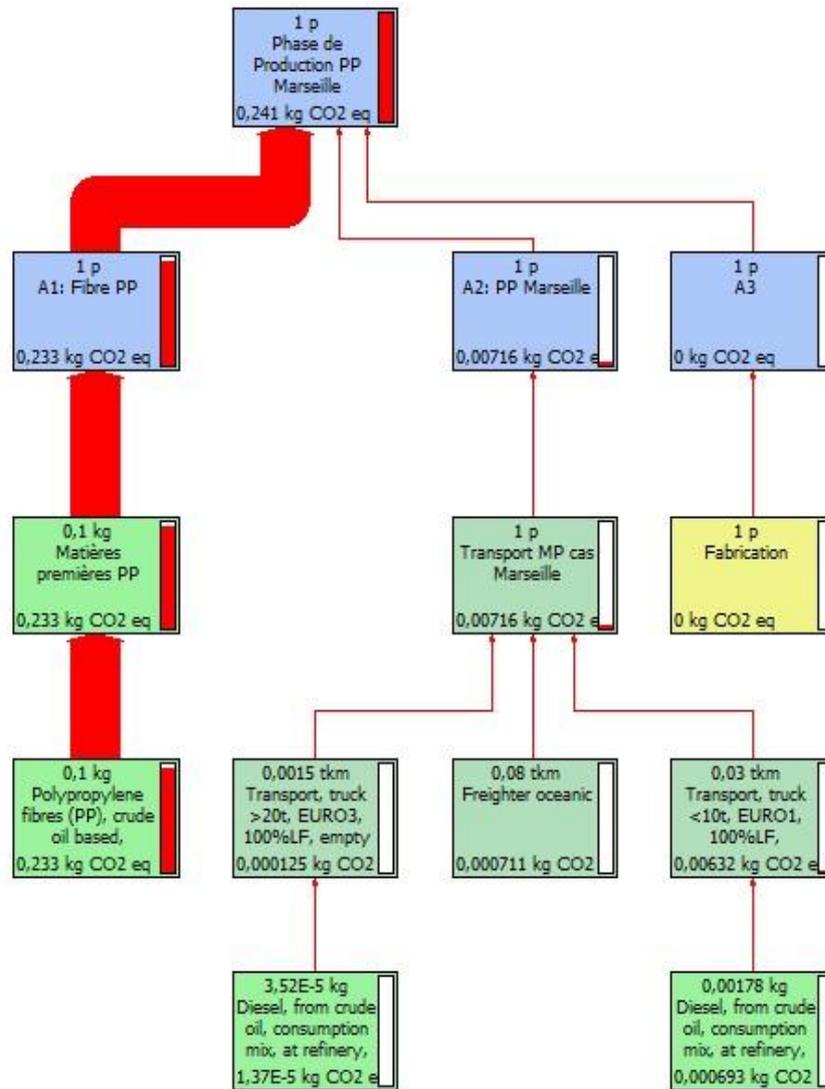


Figure IV. 11. Emission positive de CO₂ lors de la production de PP à Marseille.

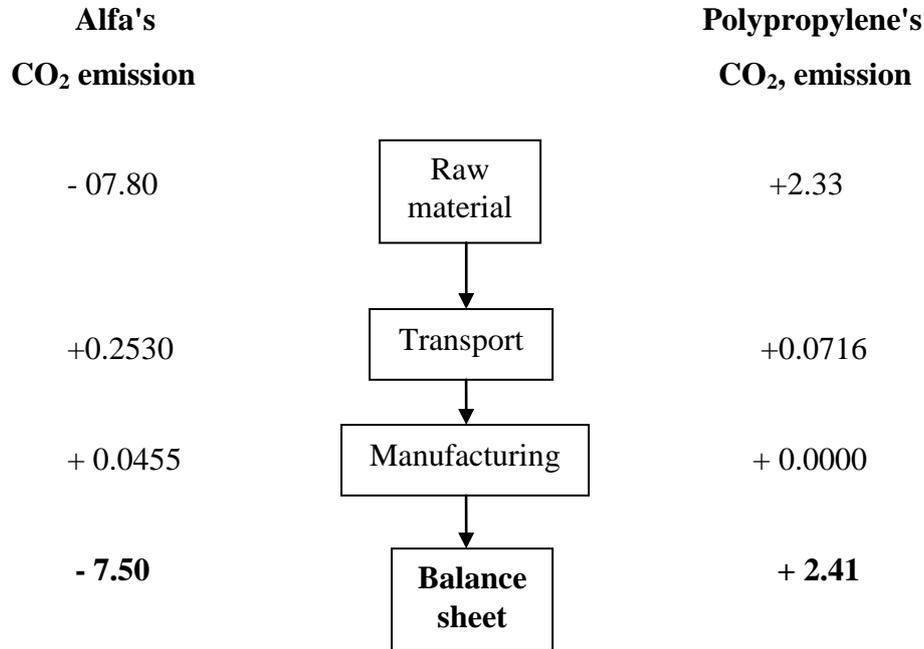


Figure IV. 12. *Comparaison des émissions de CO₂ pour les fibres de l'alfa et de polypropylène.*

Dans ce cas, la consommation de CO₂ est exprimé en chiffres négatifs liés à la production d'alpha en raison de l'absorption du CO₂ pendant la croissance de la plante. Transport et traitement de l'alfa , au contraire , produisent du CO₂ , mais en petite quantité par rapport à son absorption. A titre de comparaison, le PP produit du CO₂ pour l'extraction et le transport des matières premières (pétrole) à partir duquel il est produit et au cours de son processus industriel.

IV. Conclusion

Cette étude montre que l'ACV est une méthode intéressante pour l'évaluation des impacts environnementaux des activités de construction. En effet, elle passe en revue de nombreux impacts et permet leur différenciation. Le changement climatique n'est pas le seul impact envisagé, de nombreux autres le sont aussi qui prennent en considération la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles.

En ce qui concerne les résultats, plusieurs points peuvent être mis en évidence :

1- les FPP sont produites à partir de pétrole. Les impacts les plus forts liés à l'utilisation de ces fibres sont, par ordre décroissant d'importance, liés à l'épuisement des énergies fossiles, le changement climatique (lié à l'émission de gaz à effet de serre, parmi lesquels le CO₂), l'émission atmosphérique de particules, l'écotoxicité marine et l'oxydation photochimique. Parmi ces impacts, l'extraction du pétrole est le plus important, suivi par le transport de pétrole brut, puis le procédé industriel de production du PP qui, en comparaison avec les deux premiers, est très faible. Les autres impacts sont plus bas et certains peuvent même être considérés négligeables (occupation des terres agricoles et urbaines, transformation des terres naturelles, raréfaction de l'eau).

L'alfa, par comparaison, montre un bénéfice important pour l'environnement lié à l'absorption du CO₂ atmosphérique par la plante lors de sa croissance et de faibles impacts principalement dus au transport de l'alfa brut.

Quand les FA sont comparées aux FPP (Figure 7), on note que l'usage du PP est très impactant sur la consommation des énergies fossiles, quel que soit le site de production (Belgique ou Sud de la France, pour un emploi en Algérie), tandis que celui de l'alfa est bénéfique pour le changement climatique. Quand les autres catégories d'impacts sont considérées, l'alfa montre toujours les impacts les plus faibles.

2. Même si la quantité de fibres utilisées dans le béton est faible (1% en masse pour l'alfa, 0,1 % pour le PP), remplacer le PP par de l'alfa serait bénéfique pour l'environnement en Algérie mais aussi dans les autres pays du pourtour méditerranéen notamment pour les travaux nécessitant de grandes quantités de béton tels que des bâtiments administratifs ou d'éducation, des quartiers nouveaux ou villes nouvelles, des barrages, des usines, etc...

3. En ce qui concerne le développement durable, l'alfa peut être utilisée pour produire du béton « vert » selon les 3 piliers du développement durable : social (maintien de l'agriculture dans les zones éloignées des villes et limiter ainsi l'exode rural), économique (créer et développer des activités économiques dans ces zones) et environnemental (remplacer des constituants industriels par des constituants naturels biosourcés). Ce béton « vert » présente, bien évidemment, de plus, un intérêt sur le plan du génie civil avec des résistances mécaniques s'apparentant à celles des bétons de structure (Khélifa et al., 2016 [24]).

4. Construire en béton est incontournable de nos jours, en particulier dans les pays à forte sismicité. Avec une telle obligation, il est préférable de concevoir un béton qui puisse inclure

le moins de constituants artificiels que possible afin de réduire ses impacts sur l'environnement.

V. Remerciements

Nos remerciements vont aux ouvriers et agriculteurs, exploitants de l'alfa, qui ont bien voulu répondre à nos questions concernant son mode de production et de récolte.

V. I. References bibliographiques

- [1] Gursel A.P, Masanet E, Horvath A, Stadel A., *Life-cycle inventory analysis of concrete production : a critical review*, Cement & Concrete Composites, 51; pp. 38-48; 2014.
- [2] Xing S, Xu Z, Jun G., *Inventory analysis of LCA on steel- and concrete construction office buildings*, Energy and Buildings, 40 ; pp. 1188-1193; 2008.
- [3] Lippiat B, Ahmad S., *Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete : the BEES approach*. In : Wang K, editor. International Workshop on sustainable development and concrete technology, Ames : Iowa State University, pp. 213-230; 2004.
- [4] IEA, WBCSD., *Cement technology roadmap 2009- carbon emissions reductions up to 2050*. Paris, France : International Energy Agency [IEA], World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2009.
- [5] Maia de Souza D., Lafontaine M., Charron-Doucet F., Bengoa X., Chappert B., Duarte F., Lima L., *Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context*. Journal of Cleaner Production, 89; pp.165-173; 2015.
- [6] Van de Heede P. and De Belie N., *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes*, Cement & Concrete Composites, 34 ; pp. 431-442, 2012.
- [7] Gursel A.P, Maryman H., Ostertag C., *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of « green » concrete mixes with rice husk ash*. Journal of Cleaner Production, 112 (1); pp. 823-836, 2016.
- [8] Jiménez C., Barra M., Josa A., Valls S., *LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods*, Construction and Building material, 84, 245-252; 2015.
- [9] Nobili A., Lanzoni L., Tarantino A.M., *Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced road pavement*, Construction and Building Materials 47; pp. 888–895; 2013.
- [10] Hannant D.J., *Durability of cement sheets reinforced with polypropylene networks*,



Magazine of Concrete Research, 35(125); pp.197–204; 1983.

- [11] Grilli A., Bocci M., Tarantino A.M., *Experimental investigation on fibre-reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt*. Construction and Building Material, 38; pp. 491-496; 2013.
- [12] Al Qadi A. N. S., Al-Zaidyeen S. M., *Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 26 (1); pp. 33-39; 2014.
- [13] Mazzucco G., Majorana, C. E., Salomoni V. A., *Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions*, Computers and Structures. 154; pp. 17-28; 2015.
- [14] Ramezani pour A. A., Esmaeili M., Ghahari S. A., Najafi M. H., *Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers*, Construction and Building Materials, 44; pp. 411–418, 2013.
- [15] Meishan P., Dujin W., Xianbo H., Zhao Y., Yizhung X., Jinguang W., Duanfu X., *Performance characteristics of subdenier monofilament polypropylene fiber reinforced mortars*. Journal of Applied Polymer Science, 94 (6); pp. 2251–2256, 2004.
- [16] Laidoudi B., Crigny A., Ferrari J., Flamin C., Dupré B., *Caractérisation de la paille de colza en vue d'une valorisation dans la construction et la rénovation*. ECOBAT Sciences et Techniques pp. 136-149, 2014.
- [17] Savastano H. Jr., Warden P. G., *Guest Editorial. Special theme issue Natural fibre reinforced cement composites*, Cement & Concrete Composites, 27 ,p. 517, 2005.
- [18] Agopyan V., Savastano H. Jr., John V. M., Cincotto M. A., *Developments on vegetable fibre–cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview*, Cement & Concrete Composites, Cement & Concrete Composites, 27 (5), pp. 527-536, 2005.
- [19] Ali M., *Seismic performance of coconut-fibre-reinforced-concrete columns with different reinforcement configurations of coconut-fibre ropes*, Construction and Building Materials, 70; pp. 226-230, 2014.
- [20] Coutts S. P., *A review of Australian research into natural fibre cement composites*. Cement & Concrete Composites, 27; pp. 518–526, 2005.



- [21] Toubon L., Laidoudi B., Crigny A., Amony S., Dupré B., *Blocs de construction en béton de lin : analyse du cycle de vie*, ECOBAT Sciences et Techniques – Matières et matériaux pour l'enveloppe du bâtiment pp; 218-224, CODEM 2012 2, 2012.
- [22] Rahim M., Douzane O., Tran Le A. D., Promis G., Laidoudi B., Crigny A., Dupre B., Langlet T., *Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity*, Energy & Buildings, 88; pp. 91-99, 2015.
- [23] Sellami A., Merzoud M., Amziane S., *Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers* Construction and Building Materials, 47; pp. 1117-1124, 2013.
- [24] Khelifa M. R., Leklou N., Bellal T., Hebert R. L., Ledesert A. B., *Is alfa a vegetal fibre suitable for making green reinforced concrete? European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-21, august 2016
- [25] NF EN 197-1 Cement - Part 1: *Compositions. Specifications and Conformity Criteria for Common Cement*, European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
- [26] Dallel M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa - (Stipa tenacissima L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, Thèse de doctorat de l'université de Haute Alsace, 2012.
- [27] Raymond COUDERC, *Une « cueillette industrielle »: l'alfa en Algérie, in Méditerranée (Persée)*, Deuxième série, Tome 19; pp 3-16, 1974.
- [28] Hardings K. G., Dennis J. S., Von Blottnitz H., Harrison S. T. L., *Environmental analysis of plastic production processes: comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly-β-hydroxybutyric acid using life cycle analysis*. Journal of Biotechnology, 130 (1); pp. 57-66; 2007.
- [29] Kandanadond K., *The Life Cycle Assessment of a Polypropylene Product, part A: Raw Materials, Manufacturing and Disposal Scenario*. Applied Mechanics and Materials, 535; pp. 515-518, 2014.
- [30] Arnold J. C., Alston S. M., *Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters*. Journal of Environmental Management, 94 (1), pp. 1-12, 2012.
- [31] Xu X., Jayaraman K., Morin C., Pecqueux N., *Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites*. Journal of Materials Processing Technology, 198 (1-3); pp. 168-177, 2008.



Conclusion Générale & Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

V. 1. Conclusions générales

En tenant compte des conditions dans lesquelles notre travail a été effectué (formulation et classe des bétons étudiés ainsi que des fibres utilisées), nous pouvons conclure ce qui suit :

V. 1. 1. Formulation des bétons

Pour obtenir des bétons de structures renforcés de fibres d'alfa de classe de résistance C44/55, la démarche suivante a été adoptée :

Des sept formulations préliminaires (OC, PC, AC-0.1, AC-1, AC-1.5, AC-2 et AC-2.5), seules cinq d'entre elles ont été retenues dont le OC et le PC, comme bétons témoins et AC-0.1, AC-1 et AC-1.5 comme bétons de fibres d'alfa.

A partir d'une étude macroscopique et l'analyse au MEB de nos cinq bétons, nous pouvons conclure que l'utilisation des fibres d'alfa non traitées pour le renforcement du béton certes n'améliore pas la résistance à la compression simple et la maniabilité du béton mais contribue à l'amélioration de sa résistance à la traction comparée au béton ordinaire et au béton renforcé de fibres de polypropylène, ce qui pourrait lui offrir une meilleure résistance aux poussées sismiques et retarder sa fissuration.

V. 1. 2. Durabilité des bétons étudiés face à l'attaque sulfatique externe et à la sollicitation thermique

V. 1. 2. 1. Face à l'attaque sulfatique externe

Deux protocoles de simulation d'attaque sulfatique externe ont été utilisés :

* Le premier est l'immersion complète de nos échantillons dans une solution dosée à 12,5% de Na_2SO_4 pendant plus de 18 ans et qui n'a abouti à aucun endommagement visible à l'œil nu (fissuration et gonflement) de nos cinq bétons, ni perte ni gain de masse malgré une diminution de près de 20% des résistances. Il n'y a pas eu d'attaque sulfatique externe, ce qui s'accorde avec les travaux antérieurs [4] dans le cas où $E/C = 0,50$, ce qui est notre cas.

* Le deuxième protocole de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe, est l'immersion/séchage à 60°C qui a duré près de 45 jours. Malgré la dégradation visible sur les

échantillons AC-0.1 et AC-1 due à la formation probable de l'ettringite secondaire, le AC-1 reste le béton fibré de référence car il s'est mieux comporté par rapport au AC-0.1 et AC-1.5 et a offert les meilleures résistances à la fin du protocole.

V. 1. 2. 2. Face à la sollicitation thermique

Le béton ordinaire est le béton qui perd le plus de résistance à la compression, suivi des bétons à 0,1 et 1,5% de fibres d'alfa.

La perte de masse de tous les bétons n'excède pas les 4% et les bétons renforcés de fibres d'alfa subissent une importante perte de masse dès le début de la sollicitation thermique comparée à celle du béton renforcé de fibres de polypropylène. Cette perte de masse se traduit par trois phases ; le départ de l'eau libre de 20 à 170°C, le départ de l'eau liée entre 170 et 370°C et qui affecte plus les bétons de fibres naturelles et le départ de l'eau liée restante entre 370 et 610°C.

Le béton à 1% de fibres d'alfa est celui qui se comporte le mieux en terme de résistance face à la sollicitation thermique, sa perte de résistance est la plus faible et la plus proche de celle du béton au polypropylène, elle est de l'ordre de -20 MPa.

V. 1. 3. Analyse environnementale

Pour compléter notre étude, nous avons choisi de comparer les fibres utilisées pour le renforcement de nos bétons, à savoir les fibres d'alfa et les fibres de polypropylène en termes d'impacts environnementaux en utilisant l'analyse de cycle de vie «ACV».

L'ACV a montré que l'utilisation de l'alfa montre un bénéfice important pour l'environnement lié à l'absorption du CO₂ atmosphérique lors de sa croissance et à son transport comparée au polypropylène, très impactant en termes de fabrication à partir du pétrole et de transport des usines aux chantiers.

L'utilisation des fibres d'alfa pour le renforcement des bétons est bénéfique pour l'environnement surtout dans le cas des travaux nécessitant de grandes quantités de bétons (construction de barrages, d'usines, de nouvelles villes,...)

En ce qui concerne le développement durable, l'alfa peut être utilisée pour produire du béton « vert » selon les 3 piliers du développement durable : social (maintien de l'agriculture dans les zones éloignées des villes et limiter ainsi l'exode rural), économique (créer et développer des activités économiques dans ces zones) et environnemental (remplacer des constituants industriels par des constituants naturels biosourcés). Ce béton « vert » présente, bien évidemment, de plus, un intérêt sur le plan du génie civil avec des résistances mécaniques s'apparentant à celles des bétons de structure (Khélifa et al., 2016 [24]).

V. 2. Perspectives

Comme perspectives nous envisageons d'étudier plus profondément le comportement des fibres d'alfa seules afin de connaître ses caractéristiques, en particulier sa résistance à la traction, ainsi que son comportement vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe et l'élévation de la température.

Par ailleurs, il serait intéressant de formuler des bétons renforcés de fibres d'alfa non traitées mais cette fois-ci sans l'utilisation du superplastifiants pour obtenir un béton de structure plus respectueux de l'environnement et plus économique et aussi d'élargir l'utilisation de cette fibre aux bétons à hautes performances et aux bétons autoplaçants pour une utilisation plus générale du béton renforcés de fibres d'alfa (cas de grandes sollicitations mécaniques ou de formes architecturales complexes).



Bibliographie

Bibliographie

1. Aamr-Daya E, Langlet T, Benazzouk A, Quéneudec M. *Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles, physico-mechanical properties*. Cement and Concrete Composites, 30 (10): pp. 957–963, 2008.
2. AFPC-AFREM, LMDC, Projet National BHP 2000, ANDRA, Ecole Française du Béton, *Recommended methods for measuring of durability parameters, Proceedings of the technical AFPC/AFREM days on concrete durability*, pp. 125-134, Toulouse, 11 and 12 December 1997.
3. Aggarwal L. K., *Bagasse-reinforced Cement Composites*, Cement and Concrete Composites, Volume 17, Issue 2, pp. 107-112, 1995.
4. Agopyan V., Savastano H. Jr., John V. M., Cincotto M. A., *Developments on vegetable fibre–cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview*, Cement & Concrete Composites, Cement & Concrete Composites, 27 (5), pp. 527-536, 2005.
5. Akchiche O., Messaoud Boureghda K., *Esparto grass (Stipa Tenacissima L.), raw material of papermaking. First Part*, Chimija rastitel nogo syrja, 4, pp. 25-30, 2007.
6. Al Qadi A. N. S., Al-Zaidyeen S. M., *Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 26 (1); pp. 33-39; 2014.
7. Alarcon-Ruiz L., Platret G., Massieur E., Ehrlicher A., *The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement past*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 609-613, 2005.
8. Alcantara M. *Bétons autoplaçants et fibrages hybrides: Composition, rhéologie et comportement mécanique*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2004.
9. Alduaij J., Alshaleh K., Haque M. N., Ellaithy K., *Lightweight concrete in hot coastal areas*, Cement and Concrete Composites, 21(5–6); pp. 453–458, 1999.
10. Ali M. A., Singh B., *The effect of porosity on the properties of glass fibre-reinforced gypsum plaster*, Journal of Materials Science, Volume 10, Issue 11, pp. 1920-1928, 1975.
11. Ali M., *Seismic performance of coconut-fibre-reinforced-concrete columns with different reinforcement configurations of coconut-fibre ropes*, Construction and Building Materials, 70; pp. 226-230, 2014.

12. Alix S., Philippe E., Bessadok A., Lebrun L., Morvan C., Marais S., Effet of chemical treatments on water sorption and mechanical properties on flax fibres, *Bioresource Technology*, 100, pp. 4742-4749, 2009.
13. Alonson C., Fernandez L., *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*, *Journal of Materials Science*, 39 (9), pp. 3015-3024, 2004.
14. Arnold J. C., Alston S. M., *Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters*. *Journal of Environmental Management*, 94 (1), pp. 1-12, 2012.
15. Arupfire, HSE, *Fire resistance of concrete enclosures*, b Work Package 1: data collection- Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, London, 2005.
16. Aziz MA, Paramsivam P, Lee SL., *Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction*, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 3, Issue 2, pp. 123–132, 1981.
17. Badr A., Ashour A. F., Platten A. K., Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 32, Issue 11, pp. 1907-1920, 2006.
18. Bahloul O., Bourzam A., Bahloul A., *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), 12-14 October 2009.
19. Bahloul O., *Propriétés mécaniques, physiques et durabilité des mortiers à base de fibres cellulosiques (cas de l'alfa)*, Thèse de Magistère, Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger, 2006.
20. Bahloul O., *Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa)*, SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment in Developing Countries, ENSET-Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009.
21. Bakare I. O., Okieimen F. E., Pavithran C., Abdul Khalil H. P. S., Brahmakumar M., Mechanical and thermal properties of sisal fiber-reinforced rubber seed oil-based polyurethane composites, *Materials and Design*, 31, pp. 4274-4280, 2010.
22. Baley C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*, *Techniques de l'ingénieur*, 2005.

23. Baroghel-Bouny V., Mounanga P., Khelidj A., Loukili A., Rafai N., *Autogenous deformations of cement pastes: Part II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values*, Cement and Concrete Research, 36 (1); pp. 123-136, 2006..
24. Barr B., Hoseinian S. B., Beigi M. A., *Shrinkage of concrete stored in natural environments*, Cement and Concrete Composites, 25 (1); pp. 19-29, 2003.
25. Baste T., Bouffard M., Horlait C., Lacroix R., Marcellin S., Oliveira T., *Béton et Environnement*, Projet IFIPS S2, Université Paris-Sud 11, 2008.
26. Batra S. K., *Other long vegetable fibers*, In: Handbook of fibre Science and Technology, Ed. M.Lewin and E.M.Pearce, New York. Marcel Dekker, Vol. 4, Fibre Chemistry, pp. 505-575, 1998.
27. Bazant Z. P., Kaplan M. F., *Concrete at hightemperatures: material properties and mathematical models*, Harlow, Ed. Longman, 1996.
28. Beck K., *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altérations des pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en Sciences des matériaux, Université d'Orléans, Octobre 2006.
29. Benhamou N., Belas N., Mesbah H., Jauberthie R., Ouali A., Mebrouki A., *Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens*, Canadian Journal of Civil Engineering, 16; pp. 1195-1206, 2009.
30. Benharzallah K., Bouhicha M., Zaidi A., Lakhdari M. F., *Formulation of a repair mortar based on dune sand and natural microfibers*, Conference: Concrete Solutions 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast – UK, 1-3 September 2014.
31. Bentur A. et Mindess S., *Fibres reinforced cementitious composites*, Modern concrete technology series, Elsevier, New-York, 449p, 2007
32. Bentur A., Mindess S., *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Second Edition. Modern Concrete Technology Series, 2006.
33. Berthelot J; M., *Mécanique des Matériaux et Structures des Composites*, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés (ISMANS), Le Mans, Les Clousures, 2013.
34. Bessadok A., Langevin D., Gouanvé F., Chappey C., Roudesli S., Marais S., *Study of water sorption on modified Agave fibres*, Carbonate Polymers, , 76, pp. 74-85, 2009.
35. Bessadok A., Marais S., Gouanvé F., Colasse L., Zimmerlin I., Roudesli S., Métayer M., *Effect of chemical treatments of Alfa (Stipa tenacissima) fibres on water-sorption properties ; Composites Science and technology*, 67, pp. 685-697, 2007.

36. Bewa H., *Une disponibilité régulée de la ressource, Journée : Fibres de lin et de chanvre : Une solution naturelle pour l'industrie des composites. Solutions opérationnelles et performantes de chimie-verte*, Paris – France, Octobre 2012.
37. Bindi H., Leveque J, Parisse A., Les fibres composites d'origine naturelle, Matériaux innovants et procédés associés, les 6^{èmes} Rencontres Technologiques, La Valette –du-Var, 27 et 28 septembre 2006.
38. Blanka U., Contribution to the Ecology of Stypa Species in Central Europ: Distribution of Mineral Elements in Soils and phytomass, Folia Geobotanica & Phytotaxonomica, Vol. 8, No. 4, pp. 367-376, 1973.
39. Boeglin N., Veuillet D., *Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)*, Département Eco-Conception & Consommation Durable / Direction Clients, ADEME, 2005.
40. Bordelon A. C., Roesler J. R., Spatial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography, Cement and Concrete Composites, 53, pp. 35-43, 2014.
41. Bouchekouk M., *Etude du béton renforcé par des fibres de verre enduites de polymères thermoplastiques*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1992.
42. Boughriet R., *Fibres végétales : de nouvelles applications prometteuses émergent*, www.Actu-Environnement.com, Octobre 2009.
43. Bourzam A., *Effet des fibres de palmier sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres naturelles*, Thèse de Magistère, Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger, 1999.
44. Briemel P. A., *Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts de fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone*, Projet de fin d'étude en génie civil, INSA de Strasbourg, 2013
45. Brunetaud X., *Etude de l'influence des différents paramètres et leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton*, Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux, Ecole Centrale de Paris, 2005.
46. Brunetaud X., R., Divet L., Duragrín D., Damidot D., *Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation*, Materials and Structures, 40 (6), pp. 567-578, 2007.
47. Butschi P. Y., *Utilisation du chanvre pour la fabrication d'éléments de construction*, Thèse de Maitrise en Sciences Appliquées, Université de Moncton, Canada, mai 2004.
48. Capmas A., *Béton et développement durable*, LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.

49. Carde C., Pthologie : L'Ettringite, Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, N°9, Mars / Avril 2007.
50. Castellote M., Alonson C., Andrade C., Tirillas X., Campo J., *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating - as studied by neutron diffraction*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1633-1644, 2004.
51. Castro J., Naaman A. E., Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers, ACI Materials Journal, Volume 78-6, pp. 69-78, 1981.
52. Centre de Recherche de Pont à Mousson, *Les bétons renforcés de fibres de fonte fibraflex*, Pont à Mousson, 2001.
53. Charlet K., Baley C., Morvan C., Jernot J. P., Gomina M., Bréard J., *Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 38, Issue 8, pp. 1912-1921, 2007.
54. Charrier Cdt., L'alfa des hauts-plateaux de l'Algérie, Algérie Agricole, 32 p. 1873
55. Chen B., Liu J., *Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber*, Cement and Concrete Research, 34 (7); pp. 1259–1263, 2004.
56. Chi J. M., Huang R., Yang C. C., Chang J. J., *Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete*, Cement and Concrete Composites, 25 (2); :pp. 197–205, 2003.
57. Cimbéton., *Histoire du béton naissance et développement : 1818-1970*, Cahier des modules de Conférence pour les écoles d'architecture, CIMBETON, 2009.
58. Cohen M. D. et Mather B., *Sulfate attack on concrete – Research needs*, ACI Materials Journal, Vol, 24, N° 1, pp, 177-202, 1991.
59. Colleparidi M., *A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete*, Cement and Concrete Composites, 25, pp. 401-407, 2003;
60. Courtial M., De Noirfontaine M. N., Dunstetter F., Mounanga P., Cherkaoui K., Khelidj A., *Microstructure d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable*, XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen (Algérie), 29 au 31 mai 2011,
61. Coutts S. P., *A review of Australian research into natural fibre cement composites*. Cement & Concrete Composites, 27; pp. 518–526, 2005.
62. Dallel M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, Thèse de doctorat dans le génie des procédés, Université de haute Alsace, 2012.

63. Das M., Chakraborty D., Evaluation of Improvement of Physical and Mechanical Properties of Bamboo Fibers Due to Alkali Treatment, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 107, pp. 522–527, 2008.
64. De Winter B., The South African Stipeae and Aristideae (Gramineae), An anatomical cycological and taxonomie study, *Bothalia*, 3, 1965.
65. Deguillement D., Dupayage L., Righi N., *Marché et enjeux d'aujourd'hui et de demain pour les agro-ressources*, Journée Agro-ressources & Matériaux Textiles, Institut Français du Textile et de l'Habillement – IFTH, 2009.
66. Denecker M. F. C., Hebert R. N., Wassermann J., Dosseh G., Menendez G., Bourgès A., Experimental study of the crystallization of sodium sulfate hydrates through temperature monitoring, *Environmental Earth Sciences*, 72 (12), pp. 5089-5099, 2014.
67. Dias W. P. S., Khoury G. A., et P. J. E. Sullivan P. J. E., Mechanical Properties of Hardened Cement Paste Exposed to Temperatures up to 700°C (1292°F), *ACI Materials Journal*, vol. 87, N°2, pp. 160-166, 1990.
68. Diedrichs U., Jumppanen U., Pentalla V., Behaviour of high strenght concrete at elevated temperatures, Espoo 1989, Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, report 92, pp. 7, 1989.
69. Ding Q., Tian Y., Wang F., Zhang F., Hu S., *Autogenous shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete*, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 20 (40); pp. 123-125; 2005.
70. Djebali S., *Caractérisation des éléments de structures en bétons de fibres métalliques*, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2013.
71. Djoudi A., Khenfer M. M., Bali A., Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier, SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment in Developing Countries, ENSET-Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009.
72. Do T. V. V., *Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non*, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
73. Duhamel S., Garcia, N., *Guide d'éco-conception des produits textiles-habillement*, WWF, France, 2011.
74. Dunstan I., *Fibre reinforced cement and concrete: research into practice*, *Materials and Structures*, Rilem, 20 (2); pp. 147-150; 1987.



75. Dupas G., Mougeot D., Cali V., *Etude de la durabilité des BAP et des BHP soumis à des attaques extérieures*, Projet de fin d'études 5ème Année Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, juin 2008.
76. Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L., Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("Hempcrete") manufactured by a projection process, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 2116-2123, 2008.
77. El-Hilali A., *Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales*, Thèse en génie civil, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise, 17 décembre 2009.
78. Ellouze A., Ben Ouezdou M., Karray M. A., Beddey A., *Etude des Bétons à Fibres renforcés par des Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux*, Colloque CMEDIMAT, pp. 1-10; 06 et 07 Décembre 2005.
79. Essai d'affaissement : NFP 18-451 - *Consistance et Ouvrabilité des bétons à l'aide du Cône d'Abrams*, Normes Françaises, 2007.
80. *Etude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales*, Note de synthèse, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie- ADEME, Décembre 2005.
81. Feughelman M., *Mechanical properties of wool fibers & the two-phase model, Mechanical Properties and Structure of Alpha-Keratin Fibers: Wool, Human and related fibers*, University of New South Wales Press, pp. 28-59, 1997.
82. *Fibres et renforts végétaux Solutions composites*, Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France, 2012.
83. *Fiches Techniques Tome 2, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*, Collection Technique CIMBETON, 2013.
84. Fidelis M. E. A., Pereira T. V. C., Gomes O. F. M., Silva F. A., Filho R. D. T., The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers, *J Mater Res Technol.*, 2(2), pp. 149–157, 2013.
85. Fisher V. F., Wihaus O., Ryssel M., Oldrecht J., The water soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards, *Holztechnologie*, Volume 1, pp. 1303-1309, 1974.
86. Garkhail S. K., Heijenrath R. W. H., Peijs T., Mechanical Properties of Natural-Fibre-Mat- Reinforced Thermoplastics based on Flax Fibres and Polypropylene, *Applied Composite Materials*, Volume 7, Issue 5, pp. 351-372, 2000.

87. Généau. C, Procédé d'élaboration d'agro matériau composite naturel par extrusion biva et injection moulage de tourteau de tournesol, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, pp1-380, 2006.
88. Ghrici M., Kenai S., Mansour M. S., Kadri E, *Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume*, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 5 (2), 349-354, 2006.
89. Ghrici M., Kenai S., Meziane E, *Mechanical and durability properties of cement mortar with algeria, natural pozzolana*, Journal of Materials Science, 41 (21), pp. 6965-6972, 2006.
90. Govin A., Aspect physico-chimique de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Université de Saint-Etienne, 2004.
91. Grasley Z. C., Leung C. K., *Desiccation shrinkage of cementitious materials as an aging poroviscoelastic response*, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 1, pp. 77-89, 2011.
92. Grilli A., Bocci M., Tarantino A.M., *Experimental investigation on fibre-reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt*. Construction and Building Material, 38; pp. 491-496; 2013.
93. Grzybowski M., Shah S. P., *Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete*, Materials Journal, Volume 87, Issue 2, pp.138-148, 1990.
94. Gursel A.P, Maryman H., Ostertag C., *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of « green » concrete mixes with rice husk ash*. Journal of Cleaner Production, 112 (1); pp. 823-836, 2016.
95. Gursel A.P, Masanet E, Horvath A, Stadel A., *Life-cycle inventory analysis of concrete production : a critical review*, Cement & Concrete Composites, 51; pp. 38-48; 2014.
96. Haiping Y., Rong Y., Haiming C, Dong H. L., Chuguang Z., *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*, Fuel 86, pp 1781-1788, 2007.
97. Hameed R., Turatsinze A., Duprat F., Sellier A., *Metallic fiber reinforced concrete: Effect of fiber aspect ratio on the flexural properties*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4(5), pp. 67-72, 2009.
98. Hamza S., Saad H., Charrier B., Ayed N., Charrier - El Bouhtoury F., Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster based composites, Industrial Crops and Products, Volume 49, pp. 357-365, 2013.

99. Hannant D.J., *Durability of cement sheets reinforced with polypropylene networks*, Magazine of Concrete Research, 35(125); pp.197–204; 1983. Hannant P. J., *Fibre cements and fibre concretes*, Mineralogical Magazine, 231 P., 1978..
100. Harche M., *Contribution à l'étude de l'alfa (Stipa tenacissima L. d'Algérie): Germination, croissance des feuilles et différenciation des fibres*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et techniques de Lille, 1978.
101. Hardings K. G., Dennis J. S., Von Blottnitz H., Harrison S. T. L., *Environmental analysis of plastic production processes: comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly- β -hydroxybutyric acid using life cycle analysis*. Journal of Biotechnology, 130 (1); pp. 57-66; 2007.
102. Hebert R. N., *Pétrologie et interactions fluides - roches: des réservoirs géothermiques à l'altération des pierres du Patrimoine bâti et au comportement des bétons à Haute Température*, Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Cergy-Pontoise, 2013
103. Hertz K., *Limits of spalling of fire – exposed concrete*, Fire safety Journal, Vol 38, pp. 103-116, 2003.
104. Holmer S., Vahan A., *transition zones studies of vegetable fibre-cement paste composites*, Elsevier, Cement and concrete composites, Vol. 21, pp. 49-57, 1999.
105. Hossain K. M. A., *Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete*, Cement and Concrete Research, 34 (2): pp. 283–291, 2004.
106. IEA, WBCSD., *Cement technology roadmap 2009- carbon emissions reductions up to 2050*. Paris, France : International Energy Agency [IEA], World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2009.
107. Info Ciment ; La base documentaire de référence sur les ciments et les bétons, <http://www.infociments.fr/developpement-durable/construction-durable>
108. Irassar E. F., Bonavetti V. L., Gonzalez M., *Microstructural study of sulphate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature*, Cement and Concrete Research, 33, pp. 31-41, 2003.
109. Ishikawa A., Kuga S., Okano T., *Determination of parameters in mechanical model for cellulose III fibre*, Polymer, Vol 39, issue 10, pp. 1875-1878, 1998.
110. Jähren P. A., *Fire resistance of high strength / dense concrete with particular reference to the use of condensed silica Fume-A Review*, ACI Structural Journal, 114, pp. 1013-1050, 1989.

111. Jansson R., Bostrom L., *Fire spalling, The moisture effect*, 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Proceeding, F. Dehn, E.A.B. Koenders pp. 120-129, 2009.
112. Jiménez C., Barra M., Josa A., Valls S., *LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods*, Construction and Building material, 84, 245-252; 2015.
113. Kakooei S., Akil H. Md., Jamshidi M., Rouhi J., The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, Construction and Building Materials, Volume 27, Issue 1, pp. 73-77, 2012.
114. Kalifa P., Menneteau F. D., Quenard D., *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*, Cement and Concrete Research, vol. 30, n°12, pp. 1915-1927, 2000.
115. Kandanadond K., *The Life Cycle Assessment of a Polypropylene Product, part A: Raw Materials, Manufacturing and Disposal Scenario*. Applied Mechanics and Materials, 535; pp. 515-518, 2014.
116. Kanéma M., *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
117. Kayali O., Haque M. N., Zhu B., *Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash*, Cement and Concrete Research, 29 (11); pp. 1835-1840; 1999.
118. Keller A., Matériaux à base de fibres végétales, Etat de la technique et possibilités de développement, Rapport N° 575 de la Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT), Tänikon, Suisse, 2001.
119. Kevin Beck, Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité, Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université d'Orléans, 2006
120. Keyvani A. S., Saeki N., *Behavior of fiber concrete composites using recycled steel shavings*, The Journal of solid waste Technology and Management, V. 24, N°. 1, pp. 1-8, 1997.
121. Khelifa M. R., Brunetaud X., Al-Mukhtar M., *Size effect of concrete samples on the kinetics of sulfate attack*, Cement and Concrete Composites, 34, pp. 370-376, 2012.
122. Khelifa M. R., *Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 2009.

123. Khelifa M. R., Guessasma S., *New Computational Model Based on Finite Element Method to Quantify Damage Evolution Due to External Sulfate Attack on Self-Compacting Concretes*, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 28; pp. 260-272, 2013.
124. Khelifa M. R., *Impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie d'Ain-Touta (Algérie)*, Thèse de DEA Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, 2002.
125. Khelifa M. R., Leklou N., Bellal T., Hebert R. L., Ledesert A. B., *Is alfa a vegetal fibre suitable for making green reinforced concrete? European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-21, august 2016
126. Khelifa R., Rahim N. et M. Al-Mukhtar, *L'impact des cimenteries sur l'environnement-Le cas de la cimenterie d'Ain-Touta (Algérie)*, Annales du bâtiment et des travaux publics, p. 19-24, octobre 2005.
127. Khoury G. A., Anderberg Y., Both K., Fellingner J., Hoj N. P., Majorana C., *Fire design of concrete structures - materials, structures and modeling*, State-of-art report, Fire design of concrete structures, Fib Bulletin N° 38, p. 106, 2007.
128. Khoury G. A., *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment*, Magazine of Concrete Research, 44 (161), pp. 291-309, 1992.
129. Khoury G. A., *Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle*, Nuclear Engineering and Design, vol. 156, n°1-2, pp. 313-321, 1995.
130. Kirby R. H., *Vegetable Fibres: Botany, Cultivation and Utilization*, Leonard Hill Books, London Interscience ED., 1963.
131. Knox B. W., Well S., *L'Iliade – Poème du XXIè Siècle*, Editions Arléa, 2006.
132. Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Sibata T., Mori H., *Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete*, Cement and Concrete Research; 29 (4); pp. 611–614; 1999.
133. Kriker A., *Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par des fibres en climat chaud et sec*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2005.
134. Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M. M., Chabannet M., *Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*, Cement and Concrete Composites, 27 (5); pp. 554-564; 2005.
135. Laffitte M., *Etude de la durabilité des bétons autoplaçants*, Projet de fin d'études 5ème Année Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, Mars 2008.

136. Laidoudi B., Crigny A., Ferrari J., Flamin C., Dupré B., *Caractérisation de la paille de colza en vue d'une valorisation dans la construction et la rénovation*. ECOBAT Sciences et Techniques pp. 136-149, 2014.
137. Lane D. S. and Ozyildirim, Evaluation of the potential for internal sulfate attack through adaptation of ASTM C 342 and the Duggan test», *Cement, Concrete and Aggregates*; 21 (1), pp, 43-58, 1999.
138. Laneyrie C., *Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement à haute température des béton des granulats recyclés*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2014.
139. Lange-Kornback D., Karihaloo B. L., *Tension softening of fibre-reinforced cementitious composites*, *Cement Concrete and Composites*, Volume 19, Issue 4, pp. 315-328, 1997.
140. Le Chanvre dans tous ses états: de la plante au composite, Colloque ENSMA – Poitiers, 18-19 mars 2010.
141. Le Houerou H. N., *La végétation de la Tunisie steppique (avec référence aux végétations analogues d'Algérie, de Lybie et du Maroc)*, thèse de doctorat, Institut National de recherche Agronomique de Tunis, 624p., 1969.
142. Leklou N., *Contribution à la connaissance de l'attaque sulfatique interne*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Toulouse, 2008.
143. Lewis G., Premalal M., *Natural vegetable fibres as reinforcement in cement sheets*, *Magazine of Concrete Research*, Volume 31, Issue 107, pp. 104-108, 1979.
144. Li G., *Etude du phénomène de l'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfatés*, Thèse de doctorat en Structures et Matériaux , Ecole des Ponts et Chaussées, 1994.
145. Li V. C., Kanda T., Lin Z. C., *Influence of Fibre / Matrix Interface Properties on Complementary Energy and Composite Damage Tolerance*, *Key Engineering Materials*, Vols; 145-149; pp. 465-472; 1997.
146. Li V. C., Wang Y., Backer S., A micromechanical model of tension softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 39, Issue 5, pp. 607-625, 1991.
147. Lippiat B, Ahmad S., *Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete : the BEES approach*. In : Wang K, editor. International Workshop



on sustainable development and concrete technology, Ames : Iowa State University, pp. 213-230; 2004.

148. Lura P., Terrassi G. P., Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers: Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 49, pp. 36-42, 2014.

149. Maghchiche A., Haouam A., Immirzi B., *Extraction and characterization of Algerian alfa grass short fibers (Stipa tenacissima)*, *Chemistry and Chemical Technology*, Vol. 7, N° 3, pp. 339-344, 2013.

150. Magion C., Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.

151. Maia de Souza D., Lafontaine M., Charron-Doucet F., Bengoa X., Chappert B., Duarte F., Lima L., *Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context*. *Journal of Cleaner Production*, 89; pp.165-173; 2015.

152. Maire R., *Flore d'Afrique du Nord, 2, Monocotyledonae, Glumiflorae, Gramineae, sf.*, Pooideac, Ed. Lechevalier P., p. 63, Paris, 1953.

153. Mather B., *Sulphate attack on hydraulic cement concrete*, Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, p12-23, 2000.

154. Maya Jacob J., Rajesh D. Anandjiwala., *Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites*, *Polymer Composite*, pp. 187-207, 2008.

155. Mazoyer G., *Morphologie et anatomie foliaire des Stipa de l'Afrique du nord*, *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 27, P. 284, 1930.

156. Mazzucco G., Majorana, C. E., Salomoni V. A., Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions, *Computers and Structures*. 154; pp. 17-28; 2015.

157. *Mediterranea, Serie de Estudios Biologicos*, Université d'Alicante, II, N° 22, Espagne, 2011.

158. Mehta P. K., *Concrete: structure, properties and materials*, Prentice-Hall, pp. 105-169, Ed, 1986.

159. Meishan P., Dujin W., Xianbo H., Zhao Y., Yizhung X., Jingguang W., Duanfu X., *Performance characteristics of subdenier monofilament polypropylene fiber reinforced mortars*. *Journal of Applied Polymer Science*, 94 (6); pp. 2251–2256, 2004.

160. Merdia A., Talah A., Kharchi F. et Chaid R., *Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté*, Colloque International CMEDIMAT2005, Oran, Algérie, les 06 et 07 Décembre 2005.
161. Mindeguia J. C., *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
162. Molez L., Bian H., Prince-Agbojjan W., *Résistance au gel/dégel des BFUHP : Compétition entre endommagement et cicatrisation*, XXX^e Rencontres de l'AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, 2012.
163. Monfort-Windels F., *Polymères : bioplastiques oui, ressources alimentaires non*, Le Journal des Ingénieurs N°119, pp.4-9, Mars 2009.
164. Montessus de Ballore H., *Fibres végétales utilisables en papeterie*, Rev. Tun. 14, pp. 61-67, 1907.
165. Morlier P., Khenfer M. M., *Effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécaniques des ciments renforcés de fibres cellulosiques*, Materials and Structures, Volume 24, Issue 3, pp. 185-190, 1991.
166. Morton J. H., Akers S. A. S., Cooke T., *Performance of slash pine fibers in fiber cement products*, IIBCC-10th Int Inorganic Bonded Fiber Composite Conference, Sao Paulo (Brazil), November 15-18, 2006.
167. Mounanga P., Baroghel-Bouny V., Loukili A., Khelidj A., *Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro-macro correlations*, Cement and Concrete Research, 36 (1); pp. 110-122; 2006.
168. Mukherjee P. S., Satyanarayana K. G., *Structure and properties of some vegetable fibers. II. Pineapple fibre*, Journal of Materials Science, Vol 21, pp.51-56, 1986.
169. Nedjraoui D., Bédrani S., *La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte*, Vertigo ; La revue électronique des sciences de l'environnement, V 8, N°1, 2008.
170. Neuville A., *The confused world of sulfate attack on concrete*, Cement and Concrete research, 34, pp. 1275-1296, 2004.
171. Neville A. M., *Properties of concrete*, 4th edition, Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, England, 1997.
172. NF EN 197-1 Cement - Part 1: *Compositions. Specifications and Conformity Criteria for Common Cement*, European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

173. NF P 18-414. *Essais des Bétons – Essais Non Destructifs. Mesure de la Fréquence de Résonance Fondamentale*, AFNOR, 1993.
174. Nguyen L. H., *Béton de structure à propriétés d'isolation thermiques améliorées : Approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2013.
175. Nguyen T. T., *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne, Janvier 2010.
176. Nguyen V. T., *Comportement des bétons ordinaires et à haute performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions*, Thèse de doctorat, Université de cergy-Pontoise, 2013.
177. Nobili A., Lanzoni L., Tarantino A.M., *Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced road pavement*, *Construction and Building Materials* 47; pp. 888–895; 2013.
178. Norme NF X60-500, *Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité*, Octobre 1988.
179. Noumowé A., *Effet des hautes températures sur le béton (20 - 600 °C): Cas particulier du béton à hautes performances*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
180. Ouajai and Shanks R.A *Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments*. *Polymer Degradation and Stability*, 89, 327-335, 2005.
181. Oudjehih B., *Analyse et physiologie végétales*, Rapport de DEA, U.E.R Physique-Chimie-Biologie, Université de Nancy I, 1984.
182. Paiva MC, Ammar I, Campos AR, Cheikh RB, Cunha AM., *Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization*, *Compos Science and Technology*, Volume 7, Issue 6, pp. 1132-1138, 2007.
183. Pavoine A., *Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite*, Thèse de doctorat en Sciences des matériaux, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003
184. Perret C., Bossard L., *Le Coton*, Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest – Série économie, CEDEAO-CSAO/OCDE, 2006.
185. Pierard J., Dieryck V., *Le retrait au jeune âge des bétons spéciaux*, CSTC, N°02, P. 4, Février 2004.

186. Planel D., Thèse de doctorat en Génie Civil, *Les effets couplés de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons*, Université de Marne La vallée, UFR des Sciences et Technologies, le 04 Juin 2002.
187. Pliya P., *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement des bétons soumis à une température élevée*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010.
188. Portail de l'agriculture marocaine, *L'alfa : Importance écologique et socio-économique*, Terre et Vie, N° 61-62, 2002.
189. Rahim M., Douzane O., Tran Le A. D., Promis G., Laidoudi B., Crigny A., Dupre B., Langlet T., Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity, *Energy & Buildings*, 88; pp. 91-99, 2015.
190. Ramaswamy H. S., Ahuja B. M., Krishnamoorthy S., *Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres*, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 5, Issue 1, pp. 3-13, 1983.
191. Ramezani pour A. A., Esmaeili M., Ghahari S. A., Najafi M. H., *Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers*, *Construction and Building Materials*, 44; pp. 411-418, 2013.
192. Rapport du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction, *Société de Gestion des Participations – Etudes et Engineering*, Unité de Batna (Algérie), Avril 2006.
193. Rapport préliminaire, *Glissement CW134 - Wilaya de Mila*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2006.
194. Rapport, *Constatation de la dégradation du béton de l'usine de fabrication des batterie de voitures Bouzghaya - Batna*, Service Environnement de la wilaya de Batna, 2008.
195. Rapport, *Hangar de Stockage Sidi Khelifa – Coopérative de céréales et légumes secs - Wilaya de Mila*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
196. Rapport, *Pont sur Oued Djeddi – Wilaya de Biskra*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
197. Rapport, *Station de traitement des eaux de Ain-Tinn – Wilaya de Mila*, Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2006.
198. Raymond COUDERC, *Une « cueillette industrielle »: l'alfa en Algérie, in Méditerranée (Persée)*, Deuxième série, Tome 19; pp 3-16, 1974.

199. Razafinjato R. N., *Comportement des bétons à haute température : influence de la nature du granulat*, Thèse de doctorat en génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2015.
200. Reading T. J., Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces, *Concrete International*, pp. 57-65, 1985.
201. Reported by ACI Committee 544, State-of-the-art report on fibre reinforced concrete, ACI 544.1996.
202. Robert F., Colina H., Debicki G., *La durabilité des bétons face aux incendies*, Paris, Ed. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
203. Rong M. R., Zhang M. Q., Liu Y., Cheng Yang G., Han Min Zeng H. M., The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites; *Composites Science and Technology* 61, 1437-1447.
204. Rosière E., Grondin F., Loukili A., Wenger E., *Etude expérimentale et modélisation des attaques de sulfate dans les matériaux cimentaires*, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Aout 2007.
205. Rossi I., Harbouche N., Belloc A., *Méthode de composition des bétons de fibres métalliques*, Annales de l'ITBTP, N°475, pp. 37-44, 1989.
206. Rougeau P., Guiraud P., *La durabilité dans le contexte normatif européen*, LA DURABILITE DES BETONS, Presse de l'Ecole des Ponts et Chaussées, mai 2008.
207. Roussel F., Le chanvre se redécouvre une nouvelle filière d'utilisation dans le domaine des plastiques, www.Actu-Environnement.com, Mars 2006.
208. Saradhi Babu D., Ganesh Babu K., Trong-Huan W., *Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete*, *Cement and Concrete Composites*, 28 (6); 520–527, 2006.
209. Savastano H. Jr., Warden P. G., *Guest Editorial. Special theme issue Natural fibre reinforced cement composites*, *Cement & Concrete Composites*, 27 ,p. 517, 2005.
210. Schneider U., Diederichs U., Ehm C., *Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS*, *Nuclear Engineering and Design*, (67) 2, pp. 245-258, 1982.
211. Sedan D., *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment – Influence sur les propriétés mécaniques du composite*, Thèse de doctorat, Université de Limoges, novembre 2007.
212. Sellami A., Merzoud M., Amziane S., *Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers* *Construction and Building Materials*, 47; pp. 1117-1124, 2013.



213. Siddique R., Khatib J., Kaur I., *Use of recycled plastic in concrete: a review*, Waste Manage, 28 (10); pp. 1835–1852, 2008.
214. Söylev T. A., Özturan T., *Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction*, Construction and Building Materials, 73; pp. 67-75, 2014.
215. Swamy R.N., Mangat P. S., *Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 4, Issue 3, pp. 451-465, 1974.
216. Taj S., Munawar M. A., Khan S., *Natural fiber-reinforced polymer composites*, Proceedings of Pakistan Academy of Sciences, Vol 44(2), 2007.
217. Toubon L., Laidoudi B., Crigny A., Amony S., Dupré B., *Blocs de construction en béton de lin : analyse du cycle de vie*, ECOBAT Sciences et Techniques – Matières et matériaux pour l'enveloppe du bâtiment pp; 218-224, CODEM 2012 2, 2012.
218. Trabut L., *Etude de l'Halfa*, 90 p., Jourdan, Alger, 1889.
219. Trache D, Donnot A, Khimeche K, Benelmir R, Brosse N. *Physico-chemical properties and thermal stability of microcrystalline cellulose isolated from Alfa fibres*, Carbohydrate Polymer, Volume 104, pp. 223-230, 2014.
220. Tran Le A. D., Maalouf C., Mai T. H., Wurts E., Collet F., *Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope*, Energy and Buildings, 42, pp. 1797-1806, 2010.
221. Turrel L. *Le sparte (Stipa tenacissima)*, Bulletin Mensuel de la Société d'Acclimatation, 7, pp. 489-495, 1876.
222. Van de Heede P. and De Belie N., *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes*, Cement & Concrete Composites, 34 ; pp. 431-442, 2012.
223. Vi Vi D. T., *Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non*, Thèse de doctorat en Matériaux Polymères et Composites, Université de Grenoble et Université des Sciences de Hochiminh Ville, 2011.
224. Vu X. H., *Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement: influences du degré de saturation et du rapport eau/ciment*, Thèse de doctorat en Sciences de la terre et de l'Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007.
225. Wafa F. F., *Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete*, JKAU: Eng. Sci. Vol. 2, pp. 49-63, 1990.



226. Wang Y, Wu HC, Li VC., *Concrete Reinforcement with Recycled Fibers. Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 12, N°. 4, pp. 314–319, 2000.
227. Xiao J., Falkner H., On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*,41(2), pp.115-121, 2006.
228. Xing S, Xu Z, Jun G., *Inventory analysis of LCA on steel- and concrete construction office buildings*, *Energy and Buildings*, 40 ; pp. 1188-1193; 2008.
229. Xing Z., *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
230. Xu X., Jayaraman K., Morin C., Pecqueux N., *Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites*. *Journal of Materials Processing Technology*, 198 (1-3); pp. 168-177, 2008.
231. Yermak N., *Comportements à hautes températures des bétons additionnés de fibres*, Thèse de doctorat en Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise, 2015.
232. Zeim M., Leithner D., Lackner R., Mang H., *How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?*, *Cement and Concrete Research*, Volume 36, Issue 5,, Pages 929–942, 2006.

Mohammed-Rissel KHELIFA

Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables

Résumé

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Des fibres sont introduites pour le renforcement du béton de structure. Jusqu'à présent, les fibres utilisées sont généralement des fibres métalliques ou synthétiques (par exemple les fibres de polypropylène).

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés au remplacement des fibres synthétique (le polypropylène dans notre cas), par des fibres végétales naturelles à s'avoir l'alfa, une graminée méditerranéenne.

Nous avons formulé et confectionné des éprouvettes de différents types de bétons renforcés aux fibres d'alfa ainsi que deux bétons témoins, le premier ordinaire et le second renforcé de fibres de polypropylène.

La caractérisation a montré que les dosages en fibres d'alfa les plus performants sont ceux de 1% et 1,5% de fibres d'alfa, qui ont donnés des résistances mécaniques comparables à celles des bétons ordinaires et des bétons renforcés au polypropylène.

Les tests de durabilité (attaque sulfatique externe et élévation de température) ont montré que le béton renforcé à 1% de fibre d'alfa est celui dont les résultats se rapprochent de ceux des bétons ordinaires. Le béton à 1% de fibres d'alfa constitue donc le béton optimal.

L'analyse environnementale a montré que les fibres d'alfa sont beaucoup moins impactantes sur l'environnement que celles de polypropylènes quant-à l'épuisement des énergies fossiles, le changement climatique (lié à l'émission de gaz à effet de serre, parmi lesquels le CO₂), l'émission atmosphérique de particules, l'écotoxicité marine et l'oxydation photochimique.

تصنيع ودراسة تجريبية لخرسانات إيكولوجية مدعمة بألياف الحلفاء من أجل العمارات الخضراء و المستديمة .

ملخص

تعتبر الخرسانة المادة الأكثر استعمالا للانجاز في العالم ,حيث يتم إدخال ألياف من أجل تدعيم خرسانة الهياكل. حتى الآن الألياف المستعملة عامة هي الألياف المعدنية والألياف التركيبية (ألياف البولي بروبيلين على سبيل المثال).

في دراستنا هاته نقوم بتعويض الألياف التركيبية (ألياف البولي بروبيلين) بألياف نباتية طبيعية وهي الحلفاء, عشبه متوسطة (نبتة من وحيدات الفلقة تشمل النباتات الحبيبية و العلفية).

لقد قمنا بتصنيع وتحضير عينات لمختلف أنواع الخرسانات المدعمة بألياف الحلفاء وكذلك نوعين من الخرسانة كدليل الأول عادي والثاني مدعم بألياف البولي بروبيلين.

بينت الدراسة التجريبية أن تركيز ألياف الحلفاء يكون أكثر تأثيرا لما يكون تركيزها ما بين 1% و 1.5% والتي تعطي مقاومات ميكانيكية مقارنة بالخرسانات العادية والمدعمة بالبولي بروبيلين .

تجارب الديمومة (هجوم الكبريتات الخارجية و ارتفاع درجة الحرارة) بينت أن الخرسانات المدعمة ب 1% من ألياف الحلفاء هي التي أعطت نتائج قريبة من الخرسانات العادية. حيث ان الخرسانات بتركيز 1% من ألياف الحلفاء تمثل إذن الخرسانة الأمثل.

التحليل البيئي بين أن ألياف الحلفاء الأقل تأثيرا في الطبيعة مقارنة بالبولي بروبيلين بالنسبة لنفاذ الطاقات القديمه حيث ان التغير الحراري مرتبط بانبعثات غازات الاحتباس الحراري منها غاز ثاني أكسيد الكربون مما يؤدي لإنبعاثات في الغلاف الجوي للجسيمات المتسببه في التسممات الإيكولوجية البحرية والأكسدة الضوئية..

Mohammed-Rissel KHELIFA

Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables

Résumé

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Des fibres sont introduites pour le renforcement du béton de structure. Jusqu'à présent, les fibres utilisées sont généralement des fibres métalliques ou synthétiques (par exemple les fibres de polypropylène).

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés au remplacement des fibres synthétique (le polypropylène dans notre cas), par des fibres végétales naturelles à s'avoir l'alfa, une graminée méditerranéenne.

Nous avons formulé et confectionné des éprouvettes de différents types de bétons renforcés aux fibres d'alfa ainsi que deux bétons témoins, le premier ordinaire et le second renforcé de fibres de polypropylène.

La caractérisation a montré que les dosages en fibres d'alfa les plus performants sont ceux de 1% et 1,5% de fibres d'alfa, qui ont donnés des résistances mécaniques comparables à celles des bétons ordinaires et des bétons renforcés au polypropylène.

Les tests de durabilité (attaque sulfatique externe et élévation de température) ont montré que le béton renforcé à 1% de fibre d'alfa est celui dont les résultats se rapprochent de ceux des bétons ordinaires. Le béton à 1% de fibres d'alfa constitue donc le béton optimal.

L'analyse environnementale a montré que les fibres d'alfa sont beaucoup moins impactantes sur l'environnement que celles de polypropylènes quant-à l'épuisement des énergies fossiles, le changement climatique (lié à l'émission de gaz à effet de serre, parmi lesquels le CO₂), l'émission atmosphérique de particules, l'écotoxicité marine et l'oxydation photochimique.

Formulation and characterization of eco-concrete reinforced with alfa fibers for the green and sustainable Building

Abstract

Concrete is the most used building material in the world. In order to reinforce structure concretes, different kinds of fibres are added among which metallic and synthetic (e.g. polypropylene) fibres.

In our study, we have replaced polypropylene fibres by natural vegetal fibres of alfa, a grass commonly found around the Mediterranean.

We have prepared 3 kinds of concrete : alfa-reinforced concrete (with various amounts of alfa fibres), polypropylene-reinforced concrete and ordinary concrete used as references.

Characterization showed that the best amounts of alfa fibres are 1 and 1.5 %, that gave a mechanical behaviour close to that of ordinary and polypropylene-concrete.

Durability tests (sulfatic attack and high temperature) showed that the concrete reinforced with 1% of alfa fibres gives the closest results compared to ordinary concrete. Concrete with 1% of alfa fibres is hence the best concrete.

Environmental analyses showed that alfa fibres generate far less impacts than polypropylene fibres as regards fossil fuel depletion, climate change (linked with emissions of greenhouse gases among which CO₂), atmospheric emission of particles, marine ecotoxicity and photochemical oxydation.