

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2020

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA**



Faculté des Sciences et des

Sciences Appliquées

Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**MELKI Ouafa**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

**Thème :**

**Formulation d'un mortier autoplaçant fibré.**

**Évalué par le jury composé de :**

Mr. KENNOUCHE Salim	MCB	UAMOB	Président
Mr. HAMI Brahim	MCB	UAMOB	Encadreur
Mr. ARIBI Chouaib	MCB	UAMOB	Examinateur

**Année Universitaire 2019/2020**

## **Remerciements**

*Je témoigne que c'est par la grâce de **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, d'aide incessante, qu'il m'a porté et d'orientation imminente qu'il m'a accordé pour achever ce travail.*

*Je tiens à exprimer toute mon estime et ma reconnaissance envers mon encadreur **Dr. Brahim Hami** (docteur à L'université de Bouira) pour m'avoir donné la chance de réaliser ce travail, pour la confiance qu'il a manifesté à mon égard, pour son aide précieuse, pour ses conseils très constructifs et pour m'avoir soutenue et toujours encouragée.*

*Nos vifs remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en de juger et d'examiner ce travail.*

*Je remercie aussi **Dr. Slim kennouche** pour sa disponibilité, ses idées et les nombreux conseils qu'il m'a donnés.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont soutenues et à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation. Sans oublier enfin le personnel de département de génie civil de l'université de **Bouira**.*

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de mon mémoire de master, je pense plus particulièrement à mes chers parents, à mes frères : **Ahmed, Mounir et Amine** et à mes sœurs : **Samah, Houria et Samira**.*

*J'en oublie certainement encore et je m'en excuse. Encore un grand merci à tous pour m'avoir conduit à ce jour mémorable.*

## **Dédicace**

***Pour les heures pleines de bonheur et de tendresse. Pour les chaudes larmes qui hantent ma mémoire. Pour l'ampleur de tes sacrifices.***

***Pour toi ma chère maman qui mis l'avenir de tes enfants en premiers et les jouissances de la vie terrestre en dernier. Vous êtes ce que j'ai de plus cher au monde et je vous jure qu'aucun mot, ni expression ne serait exprimer tout mon amour et toute ma gratitude.***

***Merci de faire l'impossible pour moi.***

***Ma mère je dédie ce travail à vous.***

### Résumé

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre.

Le béton autoplaçant est l'un des bétons spéciaux, très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibrations par son propre poids, qui est utilisé dans les structures en béton densément armé. Ce béton nécessite une teneur en liant plus élevée. Une teneur plus élevée en ciment conduit à une conception peu économique, chaleur d'hydratation plus élevée, retrait plus élevé, etc. Ces facteurs peuvent être neutralisés par les ajouts minéraux. Le béton a de mauvaises propriétés de flexion ; ceci peut être amélioré en utilisant des matériaux fibreux. L'ajout de fibres améliore la propriété d'adoucissement des contraintes du système composite (BAPF).

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire est une étude sur les mortiers et les bétons autoplaçant fibrés. Ce manuscrit est divisé en deux parties **la première partie (chapitre I et II)** est une étude théorique sur les bétons autoplaçant et les bétons autoplaçants fibrés. **La deuxième partie** c'est une recherche bibliographique, dont laquelle nous avons présenté des travaux de recherche récents réalisés sur les BAPF.

**Mots clés :** Mortier autoplaçant (MAP), BAPF, Fluidité, Adjuvant, Fibre, Ajouts minéraux.

### Abstract

Self-compacting concrete was developed in the 1980 by researchers at the University of Tokyo in Japan. Their objective was to increase the rate of work by reducing the number of staff on site and the implementation time. Self-compacting concrete is one of the special concretes, very fluid, homogeneous and stable, placed without vibrations by its own weight, which is used in densely reinforced concrete structures. This concrete requires a higher binder content. Higher cement content leads to uneconomical design, higher heat of hydration, higher shrinkage, etc. These factors can be neutralized by mineral additions. Concrete has poor flexural properties; this can be improved by using fibrous materials. The addition of fibers improves the stress-softening property of the composite system (Self-compacting fiber-reinforced concrete). The research work presented in this thesis is a study on fiber-reinforced mortars and self-compacting concretes. This manuscript is divided into two parts **the first part (chapter I and II)** is a theoretical study on self-placing concrete and fiber-reinforced self-placing concretes. **The second part** is a bibliographic research, of which we presented recent research work carried out on self-compacting fiber-reinforced concrete.

The second part is a bibliographic research, of which we presented recent research work carried out on

**Keywords:** Self-compacting mortar (MAP), BAPF, Fluidity, Admixture, Fiber, Mineral additions.

## الملخص

تم تطوير الخرسانة ذاتية الرص في الثمانينيات من قبل باحثين في جامعة طوكيو في اليابان. كان هدفهم هو زيادة معدل العمل عن طريق تقليل عدد الموظفين في الموقع ووقت التنفيذ. الخرسانة ذاتية الرص هي واحدة من الخرسانة المبتكرة، شديدة السيولة، متجانسة ومستقرة، موضوعة بدون اهتزازات، تستخدم في الهياكل الخرسانية المسلحة بكثافة. تتطلب هذه الخرسانة محتوى رابط أعلى. يؤدي المحتوى العالي من الأسمنت إلى تصميم غير اقتصادي، وارتفاع حرارة الخليط، وانكماش أعلى إلخ. يمكن تقليل هذه العوامل عن طريق الإضافات المعدنية. الخرسانة لها خصائص انثناء ضعيفة. يمكن تحسين ذلك باستخدام الألياف. تعمل إضافة الألياف على تحسين خاصية تليين الإجهاد للخرسانة. العمل البحثي المقدم في هذه الأطروحة عبارة عن دراسة على الملاط والخرسانة ذاتية الرص المدعمة بالألياف. هذا البحث مقسم إلى جزئين: الجزء الأول (الفصل الأول والفصل الثاني) عبارة عن دراسة نظرية مفصلة عن الخرسانة ذاتية الرص والخرسانة ذاتية الرص المدعمة بالألياف. الجزء الثاني عبارة عن بحث بليوغرافي، قدمنا فيه أعمال بحثية حديثة تم إجراؤها على خرسانة ذات ضغط ذاتي مدعمة بالألياف.

**الكلمات المفتاحية:** ملاط ذاتي الرص، خرسانة ذاتية الرص مدعمة بالألياف، سيولة، خليط، ألياف، إضافات معدنية.

## Sommaire

Résumé .....	I
Liste des tableaux .....	II
Liste des figures .....	III
Liste des nomenclatures .....	IV
Introduction générale.....	1

**Chapitre I : Généralité sur les mortiers**

I. Généralité sur les mortiers .....	3
I.1 Introduction .....	3
I.2 Les différents types de mortiers.....	3
I.2.1 Les mortiers de ciment .....	3
I.2.2 Les mortiers de chaux .....	3
I.2.3 Les mortiers bâtards .....	3
I.3 Composition des mortiers .....	3
I.3.1 Liant .....	3
I.3.2 Le sable .....	4
I.4 Formulation des mortiers.....	4
I.4.1 Les mortiers fabriqués sur le chantier .....	4
I.4.2 Les mortiers industriels secs .....	4
I.4.3 Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi .....	4
I.4.4 Les mortiers de fibres.....	5
I.5 Domaines d'utilisation des mortiers .....	5
I.5.1 Les joints de maçonnerie .....	5
I.5.2 Les enduits .....	5
I.5.3 Les chapes .....	5
I.5.4 Les scellements et les calages .....	5
I.6 Mortier de ciment : .....	6
I.6.1 Définition de mortier de ciment : .....	6
I.6.2 Classification des mortiers de ciment : .....	6
I.6.3 Proportions pour le mortier de ciment .....	7
I.6.4 Composition des mortiers de ciment.....	7

**Chapitre II: Les mortiers autoplacants fibrés**

II. Les mortiers autoplacant fibrés .....	16
II.1 Définition de béton autoplacant fibré .....	16

II.2	Constituants des bétons autoplaçants .....	16
II.3	Constituants des bétons autoplaçants fibrés .....	17
II.3.1	Les ajouts minéraux .....	17
II.3.2	Les adjuvants .....	29
II.3.3	Les fibres .....	30
II.4	Caractéristique des bétons autoplaçants fibrés. ....	35
II.4.1	Caractéristique du béton autoplaçant fibrés à l'état frais .....	36
II.4.2	Caractéristiques du béton autoplaçant fibré durci .....	40
II.5	Domaine d'utilisation de béton autoplaçant fibré.....	41
II.5.1	Domaine d'utilisation de fibre d'acier.....	41
II.5.2	Domaine d'utilisation de fibre de verre.....	42
II.5.3	Domaine d'utilisation de fibre de synthétique .....	42
<b>Chapitre III: Travaux réalisés sur les bétons autoplaçants fibrés</b>		
III.	Travaux réalisés sur les bétons autoplaçants fibrés.....	43
III.1	Une étude faite par V. Athiyamaan et G. Mohan Ganesh : .....	43
III.1.1	Les mélanges réalisés .....	43
III.1.2	Résultats et discussion.....	44
III.1.3	Conclusion.....	49
III.2	Une étude faite par Paulo A. L. Fernandes · João Veludo · Nuno Almeida · João Baptista · Hugo Rodrigues : .....	49
III.2.1	Formulation des différents mélanges du béton .....	50
III.2.2	Les mélanges réalisés .....	51
III.2.3	Éprouvettes et configuration de test .....	53
III.2.4	Résultats et discussions .....	53
III.2.5	Conclusion.....	56
III.3	Une étude faite par T. Simões et al. : .....	56
III.3.1	Les mélanges réalisés .....	57
III.3.2	Résultats et discussions .....	58
III.3.3	Conclusion.....	62
III.4	Une étude faite par Burcu Akcay et Mehmet Ali Tasdemir : .....	63
III.4.1	Les mélanges réalisés .....	65
III.4.2	Résultats expérimentaux et discussion .....	65
III.4.3	Retrait autogène volumétrique et évolution de la température des pâtes .....	65
III.4.4	Conclusions .....	74

III.5	Une étude faite par Sherif Yehia, Ala Eddin Douba, Omar Abdullahi, Sharef Farrag :	
	75	
III.5.1	Les mélanges réalisés .....	75
III.5.2	Résultats et discussions .....	77
III.5.3	Conclusions .....	85
	Conclusion Générale .....	87
	Références bibliographiques .....	90

Liste des tableaux

<b>Tableau I-1:</b> Exigences physiques .	6
<b>Tableau I-2:</b> Ciment dans un lot de mortier de laboratoire .	7
<b>Tableau I-3:</b> Classification et composition des principaux ciments de la norme EN 197-1...	10
<b>Tableau I-4:</b> Résultats d'une analyse granulométrique correspondant à un sable .	12
<b>Tableau I-5:</b> dimensions nominales des tamis .	13
<b>Tableau I-6:</b> Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.	14
<b>Tableau II-1 :</b> Analyse chimique et propriétés sélectionnées des ajouts minéraux .	19
<b>Tableau II-2:</b> Propriétés des types de fibres sélectionnés .	32
<b>Tableau II-3:</b> Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône .	37
<b>Tableau II-4:</b> Appréciation de la consistance en fonction de l'étalement .	38
<b>Tableau III-1:</b> Teneur de remplacement du ciment et les proportions des matériaux.....	43
<b>Tableau III-2:</b> Proportion des constituants dans le mélange selon la méthode Nan Su. ....	44
<b>Tableau III-3:</b> Résultat des propriétés rhéologiques.....	44
<b>Tableau III-4:</b> Résultats des essais mécaniques des différents mélanges réalisés.....	45
<b>Tableau III-5:</b> Matériaux constitutifs du béton. ....	49
<b>Tableau III-6:</b> Constituants de chaque mélange de béton autoplaçant de l'étape 1. ....	51
<b>Tableau III-7:</b> Différents paramètres pour chaque mélange de BAP de l'étape 1. ....	52
<b>Tableau III-8:</b> Constituants de chaque mélange de BAPF(SCFRC) de l'étape 2. ....	52
<b>Tableau III-9:</b> Différents paramètres pour chaque mélange de béton (SCFRC) de l'étape 2.	53
<b>Tableau III-10:</b> La résistance à la compression à différents âges des mélanges de l'étape 1.	54
<b>Tableau III-11:</b> La résistance à la compression à différents âges des mélanges de l'étape 2.	55
<b>Tableau III-12:</b> propriétés Principales de toutes les fibres utilisées. ....	57
<b>Tableau III-13:</b> Montre la composition finale pour chaque cas. ....	57
<b>Tableau III-14:</b> Compositions chimiques (%) du ciment Portland, SF et MK. Les pouzzolanes et leur teneur en oxyde ont été fournis par BASF ( <b>Badische Anilin- &amp; Soda-Fabrik</b> ).....	65
<b>Tableau III-15:</b> Proportions de mélange d'échantillons de béton (1 m <sup>3</sup> ).....	65
<b>Tableau III-16:</b> Temps de prise initiale et finale des pâtes. ....	67
<b>Tableau III-17:</b> Propriétés mécaniques et paramètres de fracture des BAP à 28 jours. ....	72
<b>Tableau III-18:</b> Propriétés des agrégats utilisés. ....	76

<b>Tableau III-19:</b> Constituants des bétons (SCC, SyFRSCC, SFRSCC, et HyFRSCC) .....	76
<b>Tableau III-20:</b> Résultats de l'évaluation de béton à l'état frais. ....	77
<b>Tableau III-21:</b> Résultats de l'évaluation des propriétés mécaniques. ....	80
<b>Tableau III-22:</b> Résultats RCPT trouvés dans la littérature en comparaison avec l'étude actuelle .....	82

## Liste des figures

<b>Figure I-1:</b> Composition des mortiers .....	4
<b>Figure I-2:</b> Courbes granulométries dans différents cas .....	13
<b>Figure I-3:</b> L'essai d'équivalent de sable piston .....	14
<b>Figure I-4:</b> L'eau de gâchage .....	15
<b>Figure II-1:</b> béton autoplaçant fibré .....	16
<b>Figure II-2:</b> Différence entre le BAP et le BO .....	17
<b>Figure II-3:</b> De gauche à droite, cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (Classe F), ciment de laitier et schiste calciné .....	18
<b>Figure II-4:</b> Micrographie au microscope électronique à balayage de particules de schiste calciné à 5000X .....	21
<b>Figure II-5:</b> Micrographie au microscope électronique à balayage de particules d'argile calciné à 2000X .....	21
<b>Figure II-6:</b> Metakaolin, une argile calcinée .....	21
<b>Figure II-7:</b> Laitier granulé de haut fourneau broyé .....	23
<b>Figure II-8:</b> Micrographie au microscope électronique à balayage du laitier particules à environ 2100X .....	24
<b>Figure II-9:</b> fumée de silice sous forme de poudre .....	25
<b>Figure II-10:</b> Micrographie au microscope électronique à balayage de la fumée de silice particules à 20 000X .....	25
<b>Figure II-11:</b> Cendres volantes .....	26
<b>Figure II-12:</b> cendres volantes à environ $\times 1000$ .....	27
<b>Figure II-13:</b> différents types des fibres .....	30
<b>Figure II-14:</b> Les fibres d'acier aux extrémités crochues .....	31
<b>Figure II-15:</b> Fibres de polypropylène .....	34
<b>Figure II-16:</b> Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams .....	37
<b>Figure II-17:</b> mesure d'étalement–flow test .....	38
<b>Figure II-18:</b> Essai de la boîte en L .....	39
<b>Figure II-19:</b> Aspect d'essai L-Box ; teneur en fibres de $80 \text{ kg / m}^3$ (a) et $120 \text{ kg / m}^3$ (b)....	39
<b>Figure II-20:</b> Essai de compression d'un béton non armé .....	40
<b>Figure II-21:</b> Essai de résistance à la traction par flexion .....	41

<b>Figure III-1:</b> Propriétés rhéologiques des différents mélanges.....	44
<b>Figure III-2:</b> Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression et à la flexion. .....	46
<b>Figure III-3:</b> Résistance à la compression avec les fibres d'acier respectives.....	47
<b>Figure III-4:</b> Résistance à la flexion avec les fibres d'acier respectives. ....	47
<b>Figure III-5:</b> Résistance à la compression avec les fibres d'acier respectives.....	48
<b>Figure III-6:</b> Résistance à la flexion avec les fibres d'acier respectives. ....	48
<b>Figure III-7:</b> Courbes granulométriques des agrégats utilisés.....	51
<b>Figure III-8:</b> essai d'étalement.....	53
<b>Figure III-9:</b> Résistance à la compression du béton autoplaçant (SCC) dans le temps.....	54
<b>Figure III-10:</b> Résistance à la compression du SCFRC au fil du temps. ....	55
<b>Figure III-11:</b> Procédure de mélange: (a) avant; et (b) après avoir ajouté les fibres.....	58
<b>Figure III-12:</b> (a)Essais de compression des échantillons de mélange de référence; .....	58
<b>Figure III-13:</b> (a) Tableau contenant les densités moyennes et la porosité pour tous les mélanges; et graphiques correspondants pour (b) la densité spécifique; (c) densité apparente; et (d) la porosité.....	59
<b>Figure III-14:</b> (a) Tableau contenant le module de Young dynamique et statique moyen pour tous les mélanges; et des graphiques correspondants pour (b) le module dynamique (pundit); (c) module dynamique (résonance); et (d) module statique. ....	60
<b>Figure III-15:</b> (a) Tableau contenant les résistances moyennes à la compression et à la flexion pour tous les mélanges; et (b) module de Young dynamique par rapport à la résistance à la compression. ....	62
<b>Figure III-16:</b> Distribution granulométrique des particules de SF, MK et analyse par tamis des agrégats. ....	64
<b>Figure III-17:</b> Retrait autogène volumétrique et évolution de la température des pâtes. ....	67
<b>Figure III-18:</b> Variations de la teneur en hydroxyde de calcium des pâtes. ....	68
<b>Figure III-19:</b> t50 et temps d'écoulement total des BAP.....	69
<b>Figure III-20:</b> Variations du retrait autogène des mélanges de BAP.....	70
<b>Figure III-21:</b> Développement de la résistance à la compression des mélanges de BAP.....	71
<b>Figure III-22:</b> Courbes de déformation de charge représentatives pour les mélanges BAP...	73
<b>Figure III-23:</b> Écoulement obtenu par différents mélanges FRSCC. ....	77
<b>Figure III-24:</b> Modes de rupture des mélanges de béton sous différentes charges.....	79
<b>Figure III-25:</b> Répartition des fibres dans les mélanges FRSCC. ....	80
<b>Figure III-26:</b> La morphologie de la pâte cimentaire et formation des CSH.....	82

<b>Figure III-27:</b> Images SEM d'Échantillon SFRSCC.....	84
<b>Figure III-28:</b> Images SEM de l'échantillon SyFRSCC. ....	85

## Liste des nomenclatures

<p><b>CSH</b> : Silicate de calcium hydraté</p> <p><b>E/C</b> : Eau/Ciment</p> <p><b>Mpa</b>: Méga pascal</p> <p><b>Gpa</b>: Giga pascal</p> <p><b>E/L</b> : Eau/Liant</p> <p><b>G/S</b>: Gravier/Sable</p> <p><b>C<sub>3</sub>A</b>: Aluminates tricalcique</p> <p><b>C<sub>3</sub>S</b>: Silicates tricalcique</p> <p><b>C<sub>2</sub>S</b>: Silicates bicalcique</p> <p><b>Mf</b> : Module de finesse</p> <p><b>DRX</b> : Diffraction des rayons x</p> <p><b>MAP</b> : Mortier autoplçant</p> <p><b>P</b> : Porosité d'éprouvette</p> <p><b>Ab</b> : Absorption de l'éprouvette</p> <p><b>FS</b> : Fumé de silice</p> <p><b>MK</b> : Métakaolin</p> <p><b>SP</b> : Superplastifiant</p> <p><b>SI</b> : Système International d'unités</p> <p><b>PS</b> : équivalent de sable piston</p> <p><b>E</b>: module d'élasticité;</p> <p><b>GF</b>: énergie de fracture.</p> <p><b>f<sub>flex</sub></b>: résistance à la flexion ;</p> <p><b>f<sub>st</sub></b>: résistance à la traction par fendage.</p> <p><b>Rc</b>: Résistance en compression</p> <p><b>Rf</b>: Résistance en flexion</p> <p><b>CCV</b> : composite ciment verre</p> <p><b>W</b>: l'eau</p>	<p><b>SP</b>: superplastifiant,</p> <p><b>C</b>: ciment.</p> <p><b>ASTM</b>: American society for testing and materials</p> <p><b>ATD</b> : Analyse thermodifférentielle</p> <p><b>ATG</b> : Analyse thermogravimétrique</p> <p><b>SEM</b> : Micrographie au microscope électronique à balayage.</p> <p><b>SIA</b> : <u>Société suisse des Ingénieurs et des Architectes</u></p> <p><b>f<sub>cm</sub></b> : la force moyenne de compression du mortier</p> <p><b>fbt</b>: résistance à la traction par flexion sur prisme,</p> <p><b>fc,cube</b>: résistance à la compression.</p> <p><b>Fct</b>: résistance à la traction simple en N/mm<sup>2</sup></p> <p><b>f<sub>c</sub></b>: résistance à la compression;</p> <p><b>SCFRC</b> :self compacted fiber reinforced concrete</p> <p><b>SCC</b> : béton autoplçant</p> <p><b>SyFRSCC</b> : béton autoplçant renforcé par des fibres synthétique</p> <p><b>SFRSCC</b> : béton autoplçant renforcé par des fibres d'acier</p> <p><b>HyFRSCC</b> : béton autoplçant renforcé par des fibres hybride</p> <p><b>BAP</b> : Béton autoplçant</p> <p><b>BF</b> : béton fibré</p> <p><b>BAPF</b> : Béton autoplçant fibré</p> <p><b>BO</b> : Béton ordinaire</p> <p><b>GRC</b> : glass reinforced cement</p> <p><b>RCPT</b>: rapide chloride permeabilite teste</p>
---	--

INTRODUCTION  
GÉNÉRALE

### Introduction générale

Le béton est devenu un matériau essentiel dans l'industrie de la construction au cours des dernières décennies. De plus en plus de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables, avec de bonnes caractéristiques mécaniques.

Le besoin d'un type de béton performant et durable, qui peut répondre à un large éventail d'exigences a été augmenté. À cet égard, les composants du mélange et leur proportion seraient des paramètres cruciaux. La maniabilité du béton frais, la résistance et la durabilité du béton durci sont les principaux intérêts du développement de nouveaux types de béton.

Le béton autoplaçant (BAP) est une solution pour améliorer les exigences de maniabilité du béton frais. Différents types de fibres sont utilisés dans le béton renforcé de fibres (BF) pour améliorer les exigences mécaniques et la durabilité du béton. Compte tenu de l'avantage notable des BAP et BF, les intérêts se sont multipliés pour introduire un matériau de construction innovant pour contenir ces avantages dans un seul ensemble appelé Béton autoplaçant renforcé de fibres (BAPF). Il bénéficie des propriétés de BAP, qui est un béton hautement fluide et non ségréatif mise en place sans aucune vibration mécanique avec une maniabilité et des performances élevées. Tandis que l'ajout de fibres dans le mélange améliore la résistance et la ductilité du béton.

BAPF est un type spécial de béton affecté par les avantages et les limites de tous les BAP et BF. Le BAP se caractérise par un retrait élevé et une quantité faible d'agrégat grossier, les bétons renforcés de fibres (BF) retardent l'écaillage du béton et augmentent sa capacité de déformation.

Ainsi, le présent manuscrit représente une étude théorique et recherche bibliographique sur la formulation d'un mortier autoplaçant fibré, ce mémoire est subdivisé en trois chapitres, dont la partie théorique est présentée dans les deux premiers chapitres et la partie recherche bibliographique fait l'objet de troisième chapitre.

**Le premier chapitre** est consacré aux généralités sur les mortiers, dont lequel nous avons cité les différents matériaux qui constitue le mortier et leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques.

**Le deuxième chapitre** est une étude théorique sur les mortiers autoplacants et les mortiers autoplacants fibrés. Les caractéristiques des BAPF à l'état frais ainsi que les propriétés à l'état durci notamment les résistances mécaniques (compression et traction par flexion) ont été présentées.

Dans cette partie, on s'intéresse aussi à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

Tandis que **le troisième chapitre** présente les travaux de recherche récents sur le mortier et le béton autoplacant renforcé de fibre. Dans ce chapitre on prend tous les aspects de sujet de la formulation de BAPF, effet des constituants tels que les fibres, les ajouts minéraux, la durabilité et les propriétés à l'état frais et durci.

Enfin, nous allons terminer notre mémoire par une conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉ SUR LES MORTIERS**

## **I. Généralité sur les mortiers**

### **I.1 Introduction**

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

Le mortier est un mélange de liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants [01].

### **I.2 Les différents types de mortiers**

Selon les performances souhaitées, on utilise des formulations variées, notamment en ce qui concerne les liants [01].

#### **I.2.1 Les mortiers de ciment**

Très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m<sup>3</sup> de sable.

#### **I.2.2 Les mortiers de chaux**

Sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

#### **I.2.3 Les mortiers bâtards**

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

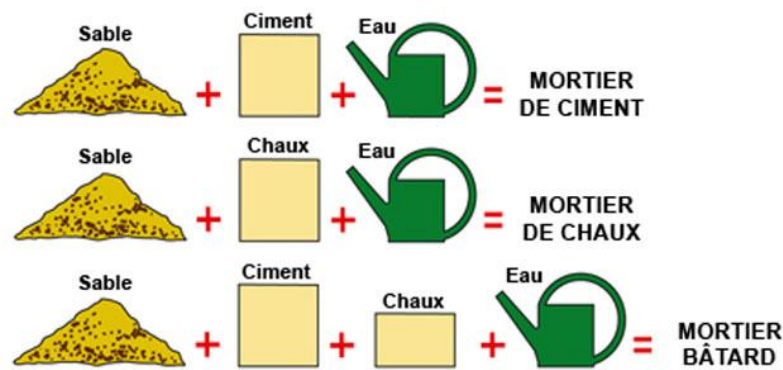
- Plus grande plasticité : plus de chaux.
- Plus grande résistance : plus de ciment.

### **I.3 Composition des mortiers**

Le mortier est un mélange de liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants.

#### **I.3.1 Liant**

Ils peuvent être du ciment, de la chaux ou un mélange entre les deux [01].



**Figure I-1:** Composition des mortiers [02].

### I.3.2 Le sable

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : Plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges. L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et bonne résistance à la propagation des fissures [01].

## I.4 Formulation des mortiers

### I.4.1 Les mortiers fabriqués sur le chantier

Le plus grand soin doit être apporté tant au stockage qu'au mélange des constituants qui seront choisis en fonction de l'ouvrage à réaliser : type et classe du liant, nature et granulométrie du sable, dosage en eau, nature des adjuvants.

### I.4.2 Les mortiers industriels secs

Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité. Les avantages présentés par ces produits sont :

- Un prédosage de composition constante, garant de régularité et de qualité ;
- Un gain de temps pour préparer le mortier ;
- Des chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins.

### I.4.3 Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

Les mortiers frais retardés et stabilisés sont élaborés et livrés par des centrales, comme le béton prêt à l'emploi. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante sur le chantier. On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 36 heures.

#### **I.4.4 Les mortiers de fibres**

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et bonne résistance à la propagation des fissures.

Ce sont soit des mortiers prémélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales [01].

### **I.5 Domaines d'utilisation des mortiers**

#### **I.5.1 Les joints de maçonnerie**

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il lie sans fissurer. Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente.

La norme XP P 10-202 - 1 (DTU 20) « Maçonnerie, béton armé, plâtre » fournit des indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiment, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre [03].

#### **I.5.2 Les enduits**

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. À côté des enduits traditionnels en trois couches décrites dans la norme NF P 15-201-1 et 2 (DTU 26.1) (Travaux de bâtiment - Travaux d'enduits de mortiers) [04], se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.

#### **I.5.3 Les chapes**

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique. Ces ouvrages sont décrits dans la norme P 14-201 « DTU 26.2 [05]. Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques ».

#### **I.5.4 Les scellements et les calages**

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser :

scelllements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite et assemblage d'éléments préfabriqués [01].

## I.6 Mortier de ciment :

### I.6.1 Définition de mortier de ciment :

Le mortier de ciment se compose d'un mélange de ciment portland ou ciment hydraulique mélangé et les matériaux plastifiants (comme le calcaire ou chaux hydratée), avec d'autres matériaux introduits pour améliorer une ou plusieurs propriétés telles que le réglage temps, maniabilité, rétention d'eau et durabilité. Ces composants sont proportionnés à la cimenterie sous conditions contrôlées pour assurer l'uniformité de performance [06].

### I.6.2 Classification des mortiers de ciment :

Les mortiers de ciments sont classés comme type N, S ou M, selon les exigences physiques prescrites dans le [tableau I-1](#).

**Tableau I-1:** Exigences physiques [06].

Type de mortier de ciment	N	S	M
Finesse, résidu sur tamis de 45 µm (n ° 325), max, %	24	24	24
Expansion de l'autoclave, max, %	1.0	1.0	1.0
Heure de prise, méthode Gillmore:			
Prise initiale, min, pas moins de	120	90	90
Prise finale, min, pas plus de	1440	1440	1440
Résistance à la compression (moyenne de trois cubes) :			
La résistance à la compression des cubes de mortier, composé de 1 partie de ciment et 3 parties de sable mélangé (demi-calibré sable standard et moitié sable standard 20–30) en volume ; préparés et testés conformément à la présente spécification, doivent être égaux ou supérieurs aux valeurs spécifiées pour les âges indiqués ci-dessous :			
– 7 jours, MPa (psi)	3.5 (500)	9.0 (1300)	12.4 (1800)
– 28 jours, MPa (psi)	6.2 (900)	14.5 (2100)	20.0 (2900)
Résistance de flexion			
– 28 jours, min, MPa (psi)	0.5 (70)	0.7 (100)	0.8 (115)
Teneur en air du mortier :			
– Min, volume %	8	8	8
– Max, volume %	17	15	15
Valeur de rétention d'eau, min, %, du débit d'origine	70	70	70

### I.6.3 Proportions pour le mortier de ciment

Historiquement, le mortier mélangé sur le terrain a été dosé par volume mesuré par incréments ou fractions de  $1\text{ft}^3$  ( $1\text{ft}^3 = 0.02832\text{m}^3$ ). Le volume  $\text{ft}^3$  on SI (le Système International d'unités) est de 28 L. Les proportions de mortier spécifiées approximer les proportions nominales 1:3 en volume, communément spécifiées pour la construction, sur la base de la masse et du volume supposés suivants des relations :

La masse de sable sec dans 28 L de sable meuble et humide est de 36 kg.

28 L de mortier de ciment de type N, ont une masse de 32 kg.

28 L de mortier de ciment de type S, ont une masse de 34 kg.

Par exemple, la quantité de ciment nécessaire pour fournir un volume de 1: 3 la proportion de ciment par rapport au sable utilisant un mortier de type N est calculée comme suit :

$$A = 1620 \times (C/B) = 1620 \times (32/108) = 480 \quad (1)$$

Où :

- A = nombre de grammes de ciment à utiliser dans le mortier avec 1620 g de sable,
- B =  $3 \times 36 = 108$  kg, la masse de sable sec en 84 (ou  $3 \times 28$ ) L de sable humide meuble,
- C = masse de mortier de ciment de type N égale à 28 L [06].

**Tableau I-2:** Ciment dans un lot de mortier de laboratoire [06].

Type de ciment de mortier	Masse de ciment(g)
N	480
S	510
M	540

### I.6.4 Composition des mortiers de ciment

#### I.6.4.1 Ciment

##### I.6.4.1.1 Définition d'un ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituant(s). Les ciments de la norme NF EN 197-1 (Ciment Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants) [07].

### I.6.4.1.2 Les constituants du ciment

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- Des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau ;
  - Des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables ;
  - Des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.).
- **Le clinker portland (K) :** est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile fixé avec précision et contenant des proportions visées de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants.
  - **Laitier granulé de haut fourneau (S) :** Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment.
  - **Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q) :** Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lors qu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.
  - **Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W) :** Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.
  - **Schistes calcinés (T) :** Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.
  - **Calcaires (L, LL) :** Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium –  $\text{CaCO}_3$  – supérieure à 75 %.
  - **Fumées de silice (D) :** Les fumées de silice sont des particules très fines (environ  $1 \mu\text{m}$ ) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferro-silicium.

- **Sulfate de calcium** : Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.
- **Constituants secondaires** : Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus (sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment). Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment.
- **Additifs** : Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs (à l'exception des pigments éventuellement ajoutés) doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment [08].

#### I.6.4.1.3 Types de ciments courants

- **Le ciment Portland CEM I** : Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.
- **Le ciment Portland composé CEM II/A ou B** : Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.
- **Le ciment de haut fourneau CEM III/A ou B** : Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.
- **CEM III/C** : (anciennement ciment de laitier au clinker) Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.
- **Le ciment composé CEM V/A ou B** : (anciennement ciment au laitier et aux cendres) Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.

Les ciments courants peuvent comporter au plus 5% de constituants secondaires [08].

**Tableau I-3:** Classification et composition des principaux ciments de la norme EN 197-1 [09].

CLASSIFICATION ET COMPOSITION DES PRINCIPAUX CIMENTS DE LA NORME EN 197-1										
Types	Différentes désignations		Constituants principaux en %							Constituants secondaire
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolane	Cendres volantes	Schiste calciné	Calcaire	
			K	S	D	P ou Q	V ou W	T	L ou LL	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	21-35	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Ciment Portland composé	CEM II/A-M	80-94	6-20						0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35						0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-90	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89	-	11-35			-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55			-	-	0-5
CEM V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	-	-	-	0-5

## I.6.4.2 Les granulats

### I.6.4.2.1 Définition

Un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple).

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton [10].

### I.6.4.2.2 Différents types de granulats

- **Les granulats naturels**

- Origine minéralogique : les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.
- Granulats roulés et granulats de carrières

- **Les granulats artificiels**

- Sous-produits industriels, concassés ou non : Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.
- Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement : Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.
- Granulats allégés par expansion ou frittage : ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme NF P 18-309) et le laitier expansé (NF P 18- 307).
- Les granulats très légers : Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 kg/m<sup>3</sup>), ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/ m<sup>3</sup>. [10]

### I.6.4.2.3 Classification des granulats

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D. le premier désigne le diamètre minimum d, des grains et le deuxième le diamètre maximum D. Lorsque d est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné 0/D.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées (Norme NFP18-101):

- Les fines 0/D avec  $D \leq 0,08$  mm,
- Les sables 0/D avec  $D \leq 6,3$  mm,
- Les gravillons d/D avec  $d \geq 2$  mm et  $D \leq 31,5$  mm,
- Les cailloux d/D avec  $d \geq 20$  mm et  $D \leq 80$  mm,
- Les graves d/D avec  $d \geq 6,3$  mm et  $D \leq 80$  mm [10].

#### I.6.4.2.4 Courbe granulométrique

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NF P 18-560).

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles  $D$  sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique [10].

- **Cas d'un sable**

Exemple : Pour le tracé de la courbe granulométrique d'un sable 0/5, on pèse une certaine quantité (après séchage) soit 2 kg par exemple. Le poids des tamisât successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisât (tableau I-4) correspondant à chacun des tamis utilisés [10].

**Tableau I-4:** Résultats d'une analyse granulométrique correspondant à un sable [10].

Maille des tamis en (mm)	Tamisats cumulés	
	En poids (g)	En (%)
8	2000	100
5	1920	98
2.5	1740	90
1.25	1300	75
0.63	860	53
0.315	500	25
0.16	200	10
0.08	40	2

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- Les limites  $d$  et  $D$  du granulat en question ;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins ; par exemple la courbe située au-dessus de celle du sable normal correspond à un sable à majorité de grains fins et c'est l'inverse pour celle située en dessous. En effet, ces trois sables sont des sables 0/5 mm

mais les proportions de grains fins (<0,5 mm par exemple) sont pour chacun d'eux : 25%, 45% et 60%.

- La continuité ou la discontinuité de la granularité ; par exemple, les courbes de sables sont continues mais la courbe du gravier 5/31,5 présente une discontinuité ; en effet le palier s'étendant de 10 à 20 mm signifie que le granulat en question ne contient pas de grains compris entre 10 et 20 mm [10].

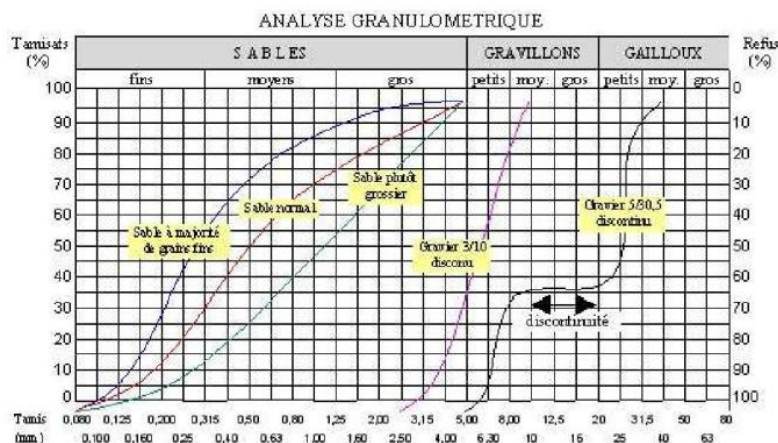


Figure I-2: Courbes granulométriques dans différents cas [10].

#### I.6.4.2.5 Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

Dans le cas de la courbe granulométrique du sable normal présenté dans le [tableau I-4](#), son module de finesse est égal à :  $MF = (98 + 90 + 75 + 53 + 28 + 10) / 100 = 3,54$

Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes :

Tableau I-5: dimensions nominales des tamis [10].

<b>Modules</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
<b>Tamis</b>	<b>0.08</b>	<b>0.100</b>	<b>0.125</b>	<b>0.160</b>	<b>0.200</b>	<b>0.250</b>	<b>0.315</b>	<b>0.40</b>	<b>0.50</b>	<b>0.63</b>	<b>0.80</b>
<b>Modules</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>
<b>Tamis</b>	<b>1.00</b>	<b>1.25</b>	<b>1.60</b>	<b>2.00</b>	<b>2.50</b>	<b>3.15</b>	<b>4.00</b>	<b>5.0</b>	<b>6.30</b>	<b>8.00</b>	<b>10.00</b>
<b>Modules</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>		
<b>Tamis</b>	<b>12.50</b>	<b>16.00</b>	<b>20.00</b>	<b>25.00</b>	<b>31.50</b>	<b>40.00</b>	<b>50.00</b>	<b>63.00</b>	<b>80.00</b>		

### I.6.4.2.6 Propreté des granulats

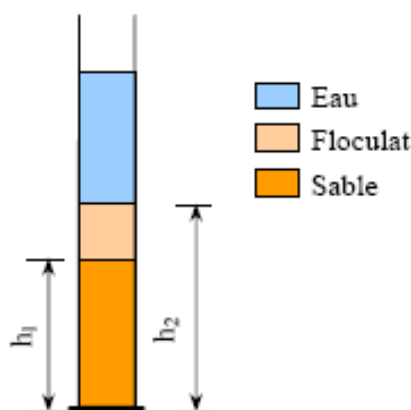
Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte.

- **Cas des sables**

L'essai "équivalent de sable piston **PS**" (norme P 18-597) permet de mesurer le degré de propreté du sable ; qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm.

$$PS = 100 \frac{h_1}{h_2}$$

La valeur de **PS** doit selon les cas être supérieure à 60 ou 65.



**Figure I-3:** L'essai d'équivalent de sable piston [10].

**Tableau I-6:** Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.

PS	Nature et qualité du sable
<60	'sable argileux' risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
60≤PS<70	'sable légèrement argileux' de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
70≤PS<80	'sable propre' à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
PS>80	'sable très propre' l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

### I.6.4.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier ou béton, nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, huiles, acides, sels). Ou autres substances qui sont nocifs pour le mortier ou le béton, L'eau potable convient toujours.

L'eau utilisée pour le béton doit être conforme aux exigences de 4.2 (Contrôle préliminaire), 4.3.1 (La teneur en chlorures), 4.3.2 (La teneur en sulfates) et 4.3.3 (la teneur en alcalins).

De plus l'eau doit satisfaire soit aux essais chimiques de 4.3.4 (Contamination nocive) ou aux essais de temps de prise et de résistance de 4.4 (Temps de prise et résistance).

L'eau potable distribuée est présumée conforme aux exigences de la présente norme.

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008 [11] (Eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton).



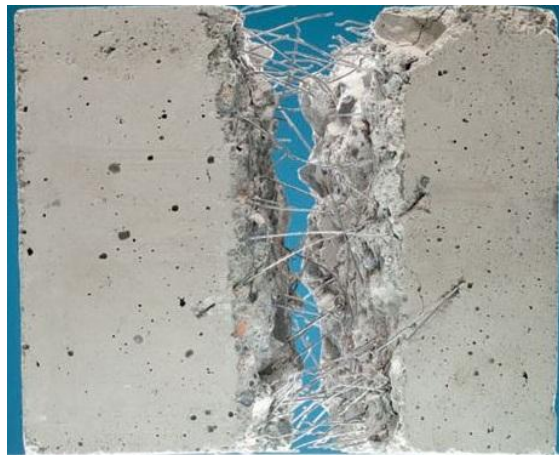
**Figure I-4:** L'eau de gâchage [12].

**CHAPITRE II**  
**MORTIER AUTOPLAÇANT FIBRÉ**

## II. Les mortiers autoplaçant fibrés

### II.1 Définition de béton autoplaçant fibré

Le béton autoplaçant renforcé de fibres (BAPF) est un nouveau matériau de construction qui bénéficie des avantages du BAP et les effets positifs de l'ajout de fibres à un matériau fragile (béton). C'est un matériau ductile qui, à l'état frais, pénètre à l'intérieur du coffrage, le remplissant de manière naturelle, passant à travers les obstacles et se consolidant sous l'action de son propre poids. BAPF peut atténuer deux faiblesses opposées : résistance à la fissuration dans le béton ordinaire et faible ouvrabilité dans le béton fibré (BF) [13].



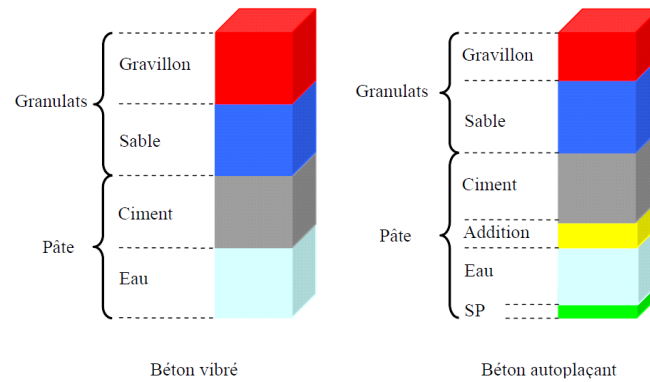
**Figure II-1:** béton autoplaçant fibré [14].

### II.2 Constituants des bétons autoplaçants

Trois principales catégories d'éléments sont utilisées dans la composition des BAP. En premier lieu, il y a les matériaux de base. Ce sont principalement le ciment, les granulats et l'eau de gâchage. Ensuite, on distingue les additions minérales et les adjuvants chimiques.

Avec le béton autoplaçant (autonivelant), le niveau de granulats doit être très bas. C'est cela qui permet de réduire considérablement les frottements et le mélange est alors plus fluide.

Cette fluidité est ce qui rend aussi facile le remplissage des coffrages. Quant aux adjuvants chimiques, ils servent généralement à accroître la fluidité du mélange. Ce sont souvent des superplastifiants qui sont employés comme adjuvants chimiques dans la fabrication du béton autonivelant [15].



**Figure II-2:** Différence entre le BAP et le BO [16].

### II.3 Constituants des bétons autoplaçants fibrés

Il s'agit d'un matériau composite qui est constitué par les éléments suivants :

- Les composants du béton traditionnel (ciment, gravier, sable, eau) ;
- Les fibres (métalliques, organiques ou minérales) ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles ;
- Les additions minérales ;
- Des adjuvants (modifient l'ouvrabilité du béton).

Le spectre des utilisations des bétons fibrés est devenu extrêmement large. Les bétons autoplaçant fibrés enrichissent l'éventail des solutions constructives en béton, grâce au développement continu d'une gamme de fibres aux propriétés multiples [17].

#### II.3.1 Les ajouts minéraux

##### II.3.1.1 Introduction

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité.

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :

Pouzzolane + chaux + eau  $\Longrightarrow$  Silicate de calcium hydraté.

Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C2S et du C3S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland [18].

Les ajouts minéraux sont des sous-produits d'autres procédés industriels. Leur utilisation judicieuse est souhaitable non seulement pour leur durabilité, étant donné la conservation de l'environnement et de l'énergie ; mais aussi pour les avantages de performance qu'ils procurent du béton. Cendres volantes, ciment de laitier, les fumées de silice et les pouzzolanes naturelles telles que le schiste calciné, le métakaolin, ou d'autres argiles calcinées, sont généralement classés en tant qu'ajouts minéraux [Figure II-3](#).



**Figure II-3:** De gauche à droite, cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (Classe F), ciment de laitier et schiste calciné [19].

**Tableau II-1** : Analyse chimique et propriétés sélectionnées des ajouts minéraux [19].

	Cendres volantes Classe F	cendres volantes Classe C	laitier de ciment	Fumée de silice	argile calciné	schiste argileux calciné	Métakaolin
SiO <sub>2</sub> , %	52	35	35	90	58	50	53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	23	18	12	0.4	29	20	43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	11	6	1	0.4	4	8	0.5
CaO, %	5	21	40	1.6	1	8	0.1
SO <sub>3</sub> , %	0.8	4.1	2	0.4	0.5	0.4	0.1
Na <sub>2</sub> O, %	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2	—	0.05
K <sub>2</sub> O, %	2.0	0.7	0.4	2.2	2	—	0.4
Total Na eq. alk, %	2.2	6.3	0.6	1.9	1.5	—	0.3
Loss on ignition, %	2.8	0.5	1.0	3.0	1.5	3.0	0.7
Fineness, m <sup>2</sup> /kg							
• Blaine	420	420	400	-	990	730	-
• Nitrogen absorption	-	-	-	20	-	-	17
Relative density	2.38	2.65	2.94	2.40	2.50	2.63	2.50

Les matériaux cimentaires supplémentaires peuvent être utilisés pour améliorer une propriété particulière du béton, comme :

- Le contrôle chaleur d'hydratation dans le béton de masse ou résistance à la réaction l'alcali silice ;
- Améliorer les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité) ;
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité ;
- Réduire le coût de la matière liante : ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30 % permet de réduire le prix de revient de la matière liante ;
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines : certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice) [19].

### II.3.1.2 Classification des ajouts minéraux

Selon la norme [EN 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux [18] :

### II.3.1.2.1 Les ajouts minéraux actifs

#### II.3.1.2.1.1 La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments [18] :

➤ **Pouzzolane naturelle**

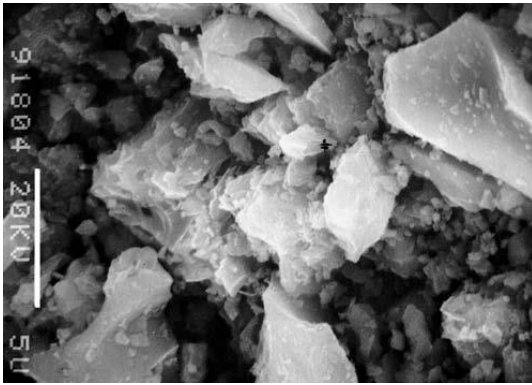
**Les pouzzolanes naturelles** sont produites à partir de gisements minéraux naturels. Certains de ces matériaux nécessitent un traitement thermique, connu sous le nom de calcination, pour les rendre pouzzolaniques. Autres comme les cendres volcaniques peuvent être utilisées avec seulement un minimum traitement (tel que le séchage et le broyage). L'expérience nord-américaine des pouzzolanes naturelles remonte à aux projets de travaux publics du début du XXe siècle, tels que les barrages, où ils ont été utilisés pour contrôler l'élévation de température dans le béton de masse. En plus de maîtrisant l'élévation de chaleur, les pouzzolanes naturelles ont été utilisées pour améliorer la résistance aux attaques de sulfate et faisaient partie des premiers matériaux trouvés pour atténuer la réaction alcali-silice.

**Metakaolin:** Le métakaolin est une argile calcinée qui est produit par calcination à basse température de l'argile kaolinique. L'argile est purifiée par traitement de l'eau avant une activation thermique très soigneusement contrôlée relativement à faible Température (650°C à 800°C [1202°F à 1472°F]) par rapport à d'autres argiles calcinées.

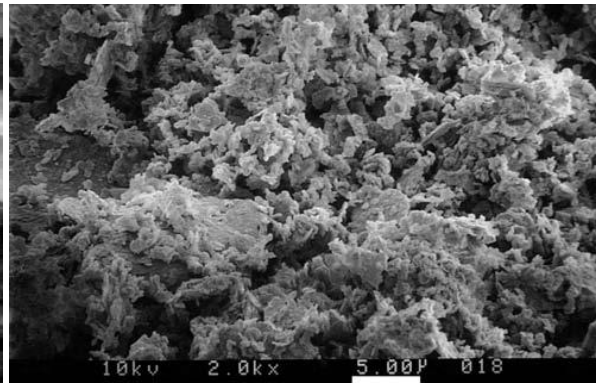
Le métakaolin est utilisé dans les applications où une perméabilité ou une résistance très élevée est requise. Dans ces applications, le métakaolin est davantage utilisé comme additif pour le béton plutôt qu'un remplacement du ciment ; typique les ajouts représentent environ 10% de la masse de ciment [19].

- **Classification des pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont classées par ASTM C618 (AASHTO M295) comme pouzzolanes de classe N (**Figures II-4 et Figure II-5**) [19].



**Figure II-4:** Micrographie au microscope électronique à balayage de particules de schiste calciné à 5000X [19].



**Figure II-5:** Micrographie au microscope électronique à balayage de particules d'argile calcinée à 2000X [19].

- **Propriétés physiques des pouzzolanes naturelles**

Les argiles calcinées sont utilisées dans le béton à usage général construction sensiblement la même que les autres pouzzolanes. Les argiles calcinées ont une densité relative comprise entre 2,40 et 2,61 avec une finesse Blaine allant de 650 m<sup>2</sup>/kg à 1350 m<sup>2</sup>/kg.

Le métakaolin est broyé à une très grande finesse avec une granulométrie moyenne d'environ 1 à 2 µm (Figure II-6). Il a une valeur de blancheur Hunter élevée de 90 sur une échelle de 0 pour le noir à 100 pour une blancheur maximale [19].



**Figure II-6:** Metakaolin, une argile calcinée [19].

- **Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories :

- Les constituants actifs : phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées;

- Les constituants inertes : phase cristallisée autre que les zéolites;
- Les constituants nocifs : substances organiques et argiles gonflantes [18].

➤ **Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (Entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées. (Cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux. Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique.

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

-Ajouts de produits chimiques ; Broyage à une finesse plus élevée ; Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- **Propriétés hydrauliques** : La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

- **Propriétés physiques de remplissage** : En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité [18].

### **II.3.1.2.1.2 Le laitier de haut fourneau**

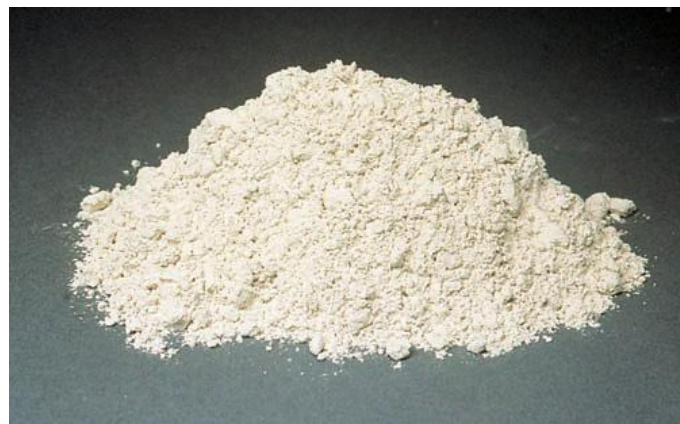
Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé.

D'un point de vue chimique (tableau II-1), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au – dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé ;
- Chaleur (étuvage, autoclavage) ;
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse) [18].

Le laitier de haut fourneau, lorsqu'il est utilisé dans le béton à usage général entre 30% et 50% du matériau cimentaire dans le mélange (PCA 2000). Certains bétons ont une composante de laitier de 70% ou plus du matériau cimentaire pour des applications telles que le béton de masse et dans l'environnement marin [19].

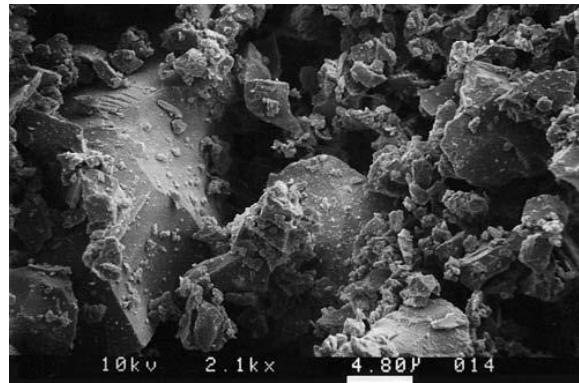


**Figure II-7:** Laitier granulé de haut fourneau broyé [19].

- **Classification de laitier de haut fourneau**

Il existe trois qualités de laitier de haut fourneau selon ASTM C989, Spécification pour le ciment de laitier à utiliser dans le béton et Mortiers.

- Le grade 80 est un ciment de laitier à faible activité indice ;
- Le grade 100 est un ciment de laitier avec une activité modérée indice ;
- Le grade 120 est un ciment de laitier à haute activité indice [19].



**Figure II-8:** Micrographie au microscope électronique à balayage du laitier particules à environ 2100X [19].

Laitier de haut Fournaux en présence d'eau et d'un activateur tel sous forme de NaOH ou de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (tous deux fournis par le ciment portland) hydrate et durcit d'une manière similaire à ciment Portland. Et dans l'absence d'activateur s'hydratera et durcira, mais le processus est très lent [19].

#### **II.3.1.2.1.3 La fumée de silice**

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de Ferro silicium ou de zircon. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de Ferro silicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice  $\text{SiO}_2$ . Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage d'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau II-1).

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [18].

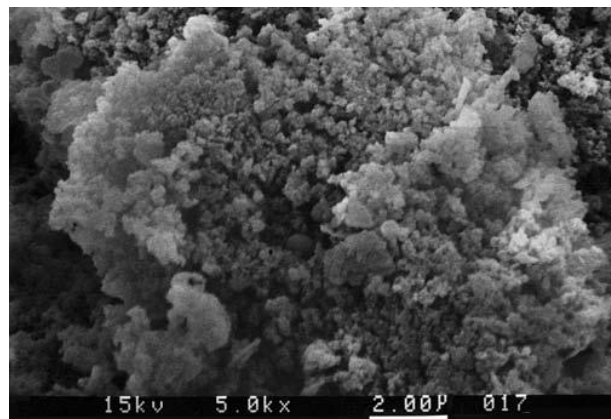
La fumée de silice est généralement utilisée en quantités comprises entre 5% et 10% en masse du matériau cimentaire total. C'est utilisé dans les applications où un degré élevé d'imperméabilité est nécessaire et également dans le béton à haute résistance [19].

➤ **Classification de fumée de silice**

Fumée de silice utilisée comme matériau pouzzolanique dans le béton peut être fourni sous l'une des trois formes selon ASTM C1240 (Spécification standard pour Fumée de silice utilisée dans les mélanges de ciment ; tel que produit, comme une suspension mélangée à de l'eau, ou sous forme densifiée ou compactée produit. En raison de sa granulométrie extrêmement fine et faible densité apparente, la fumée de silice telle que produite est très difficile à gérer. La fumée de silice est la plus couramment utilisée aux États-Unis. Sous forme densifiée (Figure II-9) [19].



**Figure II-9:** fumée de silice sous forme de poudre [19].



**Figure II-10:** Micrographie au microscope électronique à balayage de la fumée de silice particules à 20 000X [19].

#### II.3.1.2.1.4 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Cependant, comme on peut le voir dans [le tableau II-1](#); la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsque 'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces [18].

Les cendres volantes sont sous forme de poudre finement divisée ([Figure II-11](#)).



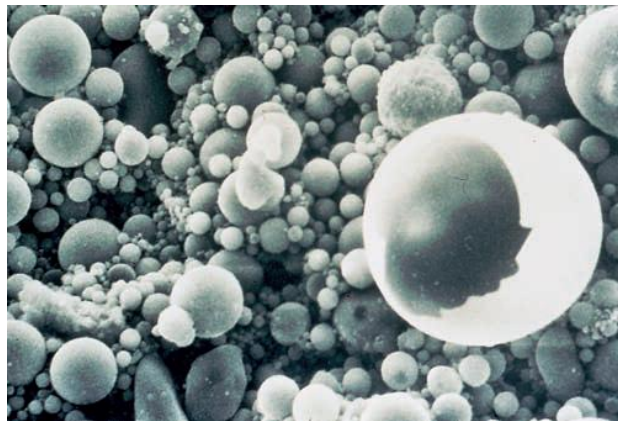
**Figure II-11:** Cendres volantes [19].

Cendres volantes est un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales électriques, est utilisée dans le béton depuis les années 1930 [19].

➤ **Classification de cendres volantes**

Les cendres volantes sont divisées en deux classes conformément à ASTM C618 (AASHTO M295), spécification standard pour Cendres volantes de charbon et pouzzolane naturelle brute ou calcinée à utiliser concrètement ; Classe F et Classe C.

- **Les cendres volantes de classe F** ont des propriétés pouzzolaniques et sont normalement produit à partir de charbon anthracite ou bitumineux brûlant répond aux exigences applicables pour cette classe comme indiqué ici. Le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) plus l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) plus l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) doit être égal ou supérieur à 70% pour les cendres volantes de classe F.
- **Cendres volantes de classe C** en plus d'avoir des propriétés pouzzolaniques possède également des propriétés cimentaires. Cendres volantes de classe C est normalement produit à partir de lignite ou de charbon sous-bitumineux qui répond aux exigences applicables pour cette classe comme donné ici. Le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) plus l'aluminium l'oxyde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) plus l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) doit être égal ou supérieur à 50% pour les cendres volantes de classe C [19].



**Figure II-12:** cendres volantes à environ  $\times 1000$  [19].

Bien que la plupart des sphères de cendres volantes sont solides, certaines particules, appelées écosphères, sont creuses (comme indiqué dans la Micrographie au microscope électronique à balayage (SEM)) [19].

#### **II.3.1.2.2 . Principaux ajouts minéraux inertes**

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à  $60 \mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière [18].

#### **II.3.1.2.2.1 Fillers calcaires**

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes .....). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui' ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains.
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA Peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et à la formation de carbo aluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat [18].

#### **II.3.1.2.2.2 La poussière**

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout [18].

## II.3.2 Les adjuvants

### II.3.2.1 Rôle des Adjuvants

Les principales raisons d'utiliser des adjuvants sont:

- Pour réduire le coût de la construction en béton ;
- Pour obtenir certaines propriétés du béton plus efficacement que par d'autres moyens ;
- Maintenir la qualité du béton pendant les étapes de mélanger, transporter, placer et durcir dans des conditions météorologiques ;
- Pour surmonter certaines urgences lors du bétonnage les opérations.

Malgré ces considérations, il devrait être supporté sachez qu'aucun Adjuvants de quelque type ou quantité que ce soit ne peut être considéré comme un substitut aux bonnes pratiques de bétonnage. L'efficacité d'un adjuvant dépend de des facteurs tels que le type, la marque, et quantité de cimentation matériaux ; teneur en eau ; forme agrégée, gradation, et proportions ; temps de mélange ; marasme et température du béton [19].

### II.3.2.2 Classification Des Adjuvants

- **La norme NF EN 934-2** classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :
  - Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants- réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants) ;
  - Ceux qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
  - Ceux qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse (NF EN 934-2) [08].
- **Les superplastifiants (NF EN 934-2)**

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité. La frontière entre les différents types d'adjuvants de cette famille n'est pas toujours très nette, les effets recherchés sont très proches et les différences obtenues sont souvent une question de nuances liées aux dosages préconisés.

Introduits dans un béton, un mortier ou un coulis, en général peu avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

Ce sont en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélaminesou de naphthalène. Ils peuvent être aussi fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois purifiés et traités (lignosulfonates).

Sur le béton frais, on constate une augmentation considérable de l'ouvrabilité pour une même teneur en eau. Ces effets ont une durée fonction de la température, de la teneur en eau et du dosage en ciment. Il n'y a ni ségrégation, ni ressuage si des précautions sont prises à la mise en œuvre ; la cohésion du béton reste très bonne.

Les superplastifiants sont particulièrement utiles pour la réalisation des fondations, dallages, radiers, sols industriels, etc., et pratiquement indispensables pour la confection des bétons de hautes performances. Ils sont couramment utilisés dans le béton prêt à l'emploi, surtout lorsqu'il est pompé.

En 1998, de nouvelles molécules issues de l'industrie chimique, les polyacrylates et les polycarboxylates, ont considérablement amélioré les performances des superplastifiants. Ces adjuvants dits de « nouvelle génération » ont permis notamment le développement des BHP, des BUHP, des BFUP et des bétons autoplaçants [08].

### II.3.3 Les fibres

Les fibres ont été utilisées dans les matériaux de construction pour des siècles. Les trois dernières décennies ont vu un intérêt croissant pour l'utilisation de fibres dans le béton prêt à l'emploi, béton préfabriqué et béton projeté.

Les fibres d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels (comme la cellulose de bois) sont disponibles dans une variété de formes, de tailles et d'épaisseurs. Ils peuvent être ronds, plats, sertis et déformés avec des longueurs typiques de 6 mm à 150 mm et épaisseurs allant de 0,005 mm à 0,75 mm (Figure II-13). Ils sont ajoutés au béton pendant le mélange. Les principaux facteurs qui contrôlent la performance du matériau composite (béton fibres) sont :

1. Propriétés physiques des fibres et de la matrice ;
2. Force de liaison entre les fibres et la matrice.



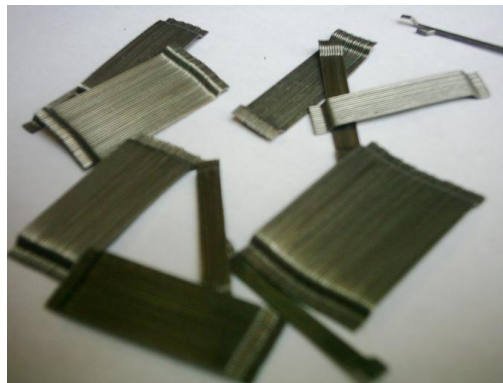
**Figure II-13:** différents types des fibres [20].

Les fibres sont généralement ajoutées au béton en faible dosages en volume (souvent inférieurs à 1%), et ont été efficaces à réduire les fissures plastique par retrait [19].

### II.3.3.1 . Types et propriétés des fibres et leur effet sur le béton

#### II.3.3.1.1 Fibres d'acier

Les fibres d'acier à de longueurs courtes discrètes d'acier avec un rapport l/d (rapport longueur au diamètre) d'environ 20 à 100, et avec une variété de sections transversales et de profils. Certaines fibres d'acier ont des extrémités crochues pour améliorer la résistance au retrait d'une matrice à base cimentaire (Figure II-14) [19].



**Figure II-14:** Les fibres d'acier aux extrémités crochues [21].

Les fibres d'acier aux extrémités crochues sont assemblées en faisceaux pour faciliter la manipulation et le mélange. Pendant le mélange, les paquets séparent en fibres individuelles [19].

- **Classification des fibres d'acier suivant ASTM A820** (Spécification standard pour les fibres d'acier pour fibre Béton armé) en quatre types différents en fonction de leur fabrication :
  - **Type I:** Les fibres métalliques étirées à froid sont les le plus disponible dans le commerce, fabriqué à partir de fil d'acier étiré.
  - **Type II:** Les fibres en feuilles coupées sont fabriquées comme le nom l'indique : les fibres d'acier sont cisailées latéralement sur des tôles d'acier.
  - **Type III:** Les fibres extraites par fusion sont fabriquées avec une technique relativement compliquée où une roue rotative est utilisée pour soulever le métal liquide d'une surface de métal fondu par action capillaire.
  - **Type IV:** Autres fibres. Pour les tolérances de longueur, de diamètre et de rapport hauteur / largeur, ainsi que les exigences minimales de résistance à la traction et de flexion.
- Les volumes de fibre d'acier utilisés dans le béton varient généralement de 0,25% à 2%. Les volumes de plus de 2% réduisent généralement la maniabilité et la dispersion des fibres et nécessitent des techniques spéciales de conception de mélange ou de mise en place du béton;

- La résistance à la compression du béton affectée légèrement par la présence de fibres ;
- L'ajout de 1,5% en volume de fibres d'acier peut augmenter la résistance à la traction directe jusqu'à 40% et la résistance à la flexion jusqu'à 150% par rapport au béton sans fibres d'acier ;
- Les fibres métalliques ont un module d'Young élevé. Elles ne sont donc pas efficaces vis-à-vis de la fissuration d'un béton au jeune âge (faible ancrage des fibres dans la matrice béton peu compacte et de faible résistance qui sollicite peu les fibres). Par contre, lorsque le béton atteint des résistances importantes, les fibres métalliques apportent une réelle contribution (Altoubat et Lange 2001) [22] ;
- La durabilité du béton renforcé par fibre d'acier dépend des mêmes facteurs que le béton conventionnel ;
- Les fibres d'acier ont un module d'élasticité élevé (tableau II-2). Leur adhérence à la matrice de ciment peut être renforcée par des ancrages ou rugosité de surface. Ils sont protégés de corrosion par l'environnement alcalin dans la matrice de cimentaire (ACI 544.1R) [19].

**Tableau II-2:** Propriétés des types de fibres sélectionnés [19].

Type de fibre	Densité relative	Diamètre (um)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité	Allongement à la rupture %
<b>Acier</b>	7.80	100-1000	500-2600	210 000	0.5-3.5
<b>Verre</b>					
E	2.54	8-15	2000-4000	72000	3-4.8
AR	2.70	12-20	1500-3700	80000	2.5-3.6
<b>Synthétique</b>					
Acrylique	1.18	5-17	200-1000	17,000-19,000	28-50
Aramide	1.44	10-12	2000-3100	62,000-120,000	2-3.5
Carbone	1.90	8-9	1800-2600	230,000-380,000	0.5-1.5
Nylon	1.14	23	1000	5200	20
Polyester	1.38	10-80	280-1200	10,000-18,000	10-50
Polyéthylène	0.96	25-1000	80-600	5000	12-100
Polypropylène	0.90	20-200	450-700	3500-5200	6-15
<b>Naturel</b>					

Cellulose de bois	150	25-125	350–2000	10,000–40,000	
Sisal	1.12– 1.15		280–600	13,000–25,000	3.5
Noix de coco		100–400	120–200	19,000–25,000	10–25
Bambou	1.50	50–400	350–500	33,000–40,000	
Jute	1.02– 1.04	100–200	250–350	25,000–32,000	1.5–1.9
Herbe d'éléphant		425	180	4900	3.6

Adapté de PCA (1991) et ACI 544.1R-96.

### II.3.3.1.2 Fibres de verre

Les premières recherches sur les fibres de verre au début des années 1960 utilisées verre borosilicaté conventionnel (verre E) (tableau II-2) et fibres de verre de silicate sodocalcique (verre A). Les résultats des tests ont montré que la réactivité alcaline entre les fibres de verre E et la pâte de ciment réduisait la résistance du béton. Les chercheurs ont abouti à des fibres de verre résistantes aux alcalis (verre AR) (tableau II-2), qui ont amélioré la durabilité à long terme, mais des pertes de résistance ont été observées (ASTMC1666, Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement) [23].

Le métakaolin peut être utilisé dans le béton renforcé de fibres de verre sans affecter de manière significative la résistance à la flexion, la déformation, le module d'élasticité et la dureté. (Marikunte, Aldea et Shah 1997) [19].

Les fibres de verre sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces du béton. Elles se dispersent facilement dans la matrice cimentaire, ce qui permet de réaliser des produits de formes très variées présentant des arêtes fines et des moulages précis. En s'opposant à la propagation des microfissures dans le béton, elles améliorent la résistance en traction du béton et sa ductilité. Elles ont une bonne résistance à la corrosion et aux attaques chimiques. Elles présentent une excellente résistance au feu (jusqu'à 800 °c). Cette caractéristique et son coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confèrent aux bétons de fibres de verre une bonne résistance à des températures élevées. Il existe plusieurs types de fibres de verre (en général à base de verre alcali-résistant et conforme à la norme NF EN 15422) qui permettent, selon leurs caractéristiques intrinsèques et leur dosage, des applications variées [24].

### II.3.3.1.3 Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont des fibres artificielles développées au cours de la recherche et développement dans les industries pétrochimique et textile. Les types de fibres utilisés dans le béton de ciment Portland sont : acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène. Le [tableau II-2](#) résume les propriétés physiques de ces fibres.

Les fibres synthétiques peuvent réduire le retrait plastique et la fissuration d'affaissement et peut aider à renforcer le béton après sa fissuration.

Les problèmes associés aux fibres synthétiques comprennent :

1. Faible liaison fibre-matrice ;
  2. Des essais de performance peu concluants pour une utilisation à faible volume de fibres avec du polypropylène, polyéthylène, polyester et nylon ;
  3. Faible module d'élasticité pour le polypropylène et le polyéthylène ;
  4. Le coût élevé des fibres de carbone et d'aramide.
- **Les fibres de polypropylène** ([Figure II-15](#)), les plus populaires des fibres synthétiques, sont chimiquement inertes, hydrophobes et légères. Ils sont produits sous forme de monofilaments cylindriques continus qui peuvent être coupés à des longueurs spécifiées ou coupés sous forme de films et de rubans et formés en fines fibrilles de section transversale rectangulaire.



**Figure II-15:** Fibres de polypropylène [19].

Utilisées à un taux d'au moins 0,1% en volume de béton, les fibres de polypropylène réduisent la fissuration plastique par retrait et la fissuration par affaissement dans l'armature en acier (Suprenant et Malch 1999). La présence de fibres de polypropylène dans le béton peut réduire le tassement des particules d'agrégat, réduisant ainsi les canaux capillaires. Les fibres de polypropylène peuvent aider à réduire l'écaillage du béton à haute résistance et à faible perméabilité exposé au feu dans des conditions humides [19].

Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes à la chaleur (température de fusion 160 °c) [24].

- **Les fibres de carbone** ont été développées principalement pour leur haute résistance, leur module élastique et leurs propriétés de rigidité pour des applications dans l'industrie aérospatiale. Par rapport à la plupart des autres fibres synthétiques, la fabrication de fibres de carbone est coûteuse et cela a limité leur développement commercial. Ils sont également inertes à la plupart des produits chimiques. La fibre de carbone est généralement produite en brins qui peuvent contenir jusqu'à 12000 filaments individuels. Les fibres sont généralement étalées avant l'incorporation dans le béton pour faciliter la pénétration de la matrice de ciment et pour maximiser l'efficacité des fibres [19].

#### II.3.3.1.4 Fibres naturelles

Les fibres naturelles ont été utilisées comme renfort bien avant l'avènement du béton fibré. Briques de boue renforcés de paille et de mortiers renforcés de crin de cheval ne sont que quelques exemples de la façon dont les fibres naturelles ont été utilisés historiquement comme forme de renforcement. De nombreux matériaux de renforcement naturels peuvent être obtenus à faible coût et énergie en utilisant la main-d'œuvre locale et le savoir-faire technique. Ces fibres sont utilisées dans la fabrication de béton à faible teneur en fibres et ont parfois été utilisées dans du béton en feuilles minces à haute teneur en fibres. Pour les propriétés typiques des fibres naturelles, voir [le tableau II-2](#). (ASTM standards include ASTM D7357, Standard Specification for Cellulose Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, and D6942, Standard Test Method for Stability of Cellulose Fibers in Alkaline Environments) [19].

#### II.4 Caractéristique des bétons autoplaçants fibrés.

Le béton possède deux comportements: **l'état frais et l'état durci**. Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est à grâce à l'eau que le béton peut être manipulé. Réduire son dosage permet :

- D'augmenter la résistance en compression et en flexion ;
- Réduire la perméabilité ;
- Réduire la contraction volumique (retrait de séchage) ;
- Moins de risques d'attaques d'agents agressifs extérieurs.

La réduction d'eau rend par contre le béton moins plastique. Avec l'incorporation des adjuvants chimiques, cela devient possible [25].

### II.4.1 Caractéristique du béton autoplaçant fibrés à l'état frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'**ouvrabilité** (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton :

- Méthode et durée de transport ;
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats) ;
- Forme, granulométrie et type de granulats ;
- Le volume d'air ;
- Le dosage en eau.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement etc. [25].

Des tests tels que L Box, Slump Flow et V Funnel sont couramment utilisés pour évaluer l'ouvrabilité de béton en raison de leur utilisation plus facile, bien qu'ils ne fournissent qu'une seule information de résultat sur les caractéristiques à l'état frais du béton. De plus, les résultats obtenus ne sont pas exprimés en termes de paramètres physiques (Damineli, B. L. et al, Roussel, N.) et il y a des études antérieures qui soulignent que ces essais ne sont pas adaptés au béton fibré.

D'autre part, il existe plusieurs d'autres études qui ont utilisé ces essais comme base pour l'analyse du béton autoplaçant fibrés(BAPF) [El-Dieb, A. S.; RedaTaha, M. M4, Abukhashaba, M. I.; Mostafa, M. A.; Adam, I. A.-Sahmaran, M.; Yurtseven, A.; OzgurYaman, I.].

L'utilisation rhéomètre rotationnelle permet d'évaluer les caractéristiques du BAPF dans différentes conditions de contrainte de cisaillement [26].

#### II.4.1.1 Mesure de la consistance du béton (Slump Test)

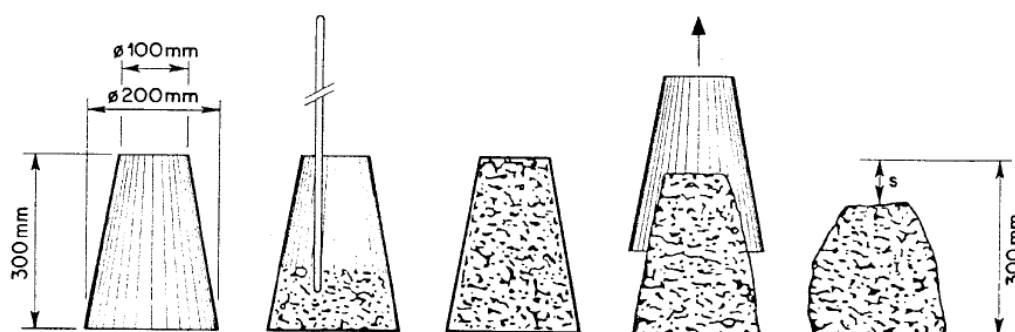
Le slump test ou le cône d'Abrams permet d'évaluer la consistance d'un béton courant, c'est-à-dire ni trop sec ni trop fluide. Cette méthode convient bien pour le contrôle du béton sur chantier lors de la réception.

La consistance est caractérisée par l'affaissement, mesuré en mm après démoulage, d'un cône en béton de forme normalisée.

Mode opératoire :

- Mouiller l'intérieur du moule ;
- Placer le moule avec la rehausse sur un support rigide et horizontal, mais non absorbant ;
- A l'aide d'une truelle remplir le moule de béton frais, en trois couches d'à peu près même hauteur, éviter le déplacement du moule en pesant sur les pattes de calage ;
- Compacter chaque couche par 25 coups de barre ;
- Retirer la rehausse, araser le dessus du moule et nettoyer le support autour du moule ;
- Retirer le moule verticalement avec précaution ;
- Mesurer l'affaissement du cône par rapport à la hauteur initiale (moule).

L'essai est complètement décrit dans la norme NF P18-451 et est schématisé sur la figure II-16.



**Figure II-16:** Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [27].

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au [tableau II-3](#) [27].

**Tableau II-3:** Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône [27].

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (m)
<b>Ferme F</b>	0 à 4	±1
<b>Pratique P</b>	5 à 9	±2
<b>Très pratique TP</b>	10 à 15	±3
<b>Fluide F1</b>	≥16	

### II.4.1.2 Mesure d'étalement (flow test)

L'essai d'étalement ou flow-test, permet d'évaluer la consistance d'un béton plastique ou fluide. Cette méthode ne convient pas pour les bétons raides ou fermes ; elle est essentiellement utilisée en laboratoires.

La consistance est caractérisée par l'étalement, mesuré en mm, d'un cône de béton de forme normalisée après une série de secousses imposées à une table normalisée.

Mode opératoire :

- Mouiller le plateau de la table et l'intérieur du moule ;
- Placer la table sur un support rigide et horizontal ;
- A l'aide d'une truelle remplir le moule de béton frais, en deux couches d'à peu près même hauteur, éviter le déplacement du moule en pesant sur les pattes de calage ;
- Compacter chaque couche par 10 coups de barre ;
- Retirer la réhausse, araser le dessus du moule et nettoyer la table autour du moule ;
- Soulever lentement le plateau supérieur jusqu'à la butée et le laisser retomber librement quinze fois en quinze secondes ;
- Mesurer la galette en deux diamètres perpendiculaires  $d_1$  et  $d_2$  et en calculer la moyenne  $d$ .

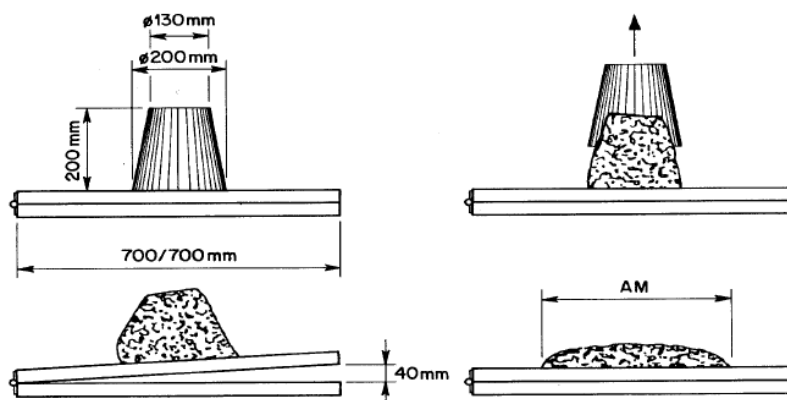


Figure II-17: mesure d'étalement–flow test [27].

La consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au [tableau II-4](#).

Tableau II-4: Appréciation de la consistance en fonction de l'étalement [27].

Classe de consistance	Étalement en cm
Pratique	30 à 40
Mou	41 à 50
Fluide	$\geq 51$

### II.4.1.3 L'essai de la boîte en L

#### ➤ Mobilité en milieu confiné

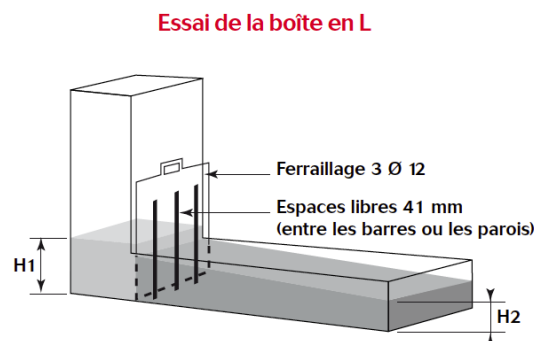
La mobilité du BAP en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, sont mesurées avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte en forme de L, puis en levant une trappe (séparant les parties verticale et horizontale de la boîte) de laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures de diamètre 12 mm (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale (H1 côté trappe) et horizontale (H2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

Cet essai est utilisé pour la formulation des BAP.

- Norme d'essai : NF EN 12350-10 [28].



**Figure II-18:** Essai de la boîte en L [28].



**Figure II-19:** Aspect d'essai L-Box ; teneur en fibres de 80 kg / m<sup>3</sup> (a) et 120 kg / m<sup>3</sup> (b) [26].

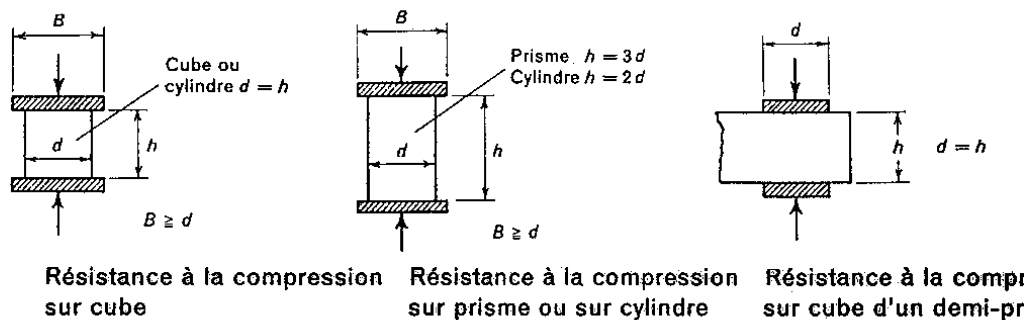
## II.4.2 Caractéristiques du béton autoplaçant fibré durci

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression.

De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat [25].

### II.4.2.1 Essai de résistance à la compression

Selon la norme SIA 162 (Société suisse des Ingénieurs et des Architectes)



**Figure II-20:** Essai de compression d'un béton non armé [29].

L'essai sur cubes ou prismes se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge devront être rectifiées ou apprêtées avec un mortier si elles ne sont pas planes ou parallèles. L'apprêtage devra être aussi mince que possible et ne devra pas éclater pendant l'essai.

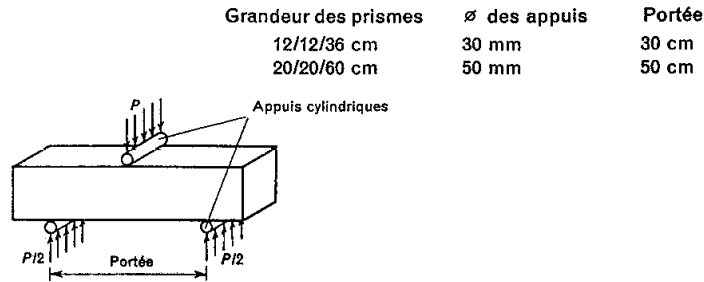
La résistance doit être égale ou supérieure aux valeurs exigées par les normes pour le type de béton correspondant. Les résistances sur cylindres (hauteur = 2 x diamètre) ou sur prismes (hauteur = 3 x largeur) peuvent être estimées à partir des formules suivantes.

$f_{c, \text{cylindre}} = 0.80 \cdot f_{c, \text{cube}} (h = 2d)$  ;  $f_{c, \text{prisme}} = 0.75 \cdot f_{c, \text{cube}} (h = 3d)$  [29].

### II.4.2.2 Essai de résistance à la traction par flexion

Cet essai permet de contrôler la qualité du béton ; il donne une indication sur la résistance à la traction par flexion du béton et donc sur sa résistance à la fissuration. Selon la norme SIA 162

## Exécution des essais



**Figure II-21:** Essai de résistance à la traction par flexion [29].

L'essai se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge devront être rectifiées ou apprêtées.

La résistance à la traction par flexion se calcule comme suit :

$$f_{cbt} = \frac{3Pl}{2bh^2}$$

Avec **P**: la charge maximale, **l**: la portée libre, **b**: la largeur et **h**: la hauteur du prisme.

Les normes ne donnent pas de valeurs minimales à obtenir pour la résistance à la traction par flexion ; les exigences doivent être précisées de cas en cas. Pour le contrôle de l'aptitude au service, la norme SIA 162/1993 recommande d'utiliser pour les bétons de qualité supérieure à B35/25 une résistance à la traction valant  $f_{ct} = 2.5 \text{ N/mm}^2$ .

$f_{cbt} = 0.80 \text{ à } 1.0 \sqrt{f_c}$ , cube

$f_{cbt} = 2.0 f_{ct}$

$f_{cbt}$  résistance à la traction par flexion sur prisme,  $f_c$ , cube résistance à la compression et  $f_{ct}$  résistance à la traction simple en  $\text{N/mm}^2$  [29].

## II.5 Domaine d'utilisation de béton autoplaçant fibré

### II.5.1 Domaine d'utilisation de fibre d'acier

- Le plus couramment utilisées dans les chaussées d'aéroport et les revêtements de piste et taxi ;
- Les tabliers de ponts, les planchers industriels et les chaussées d'autoroutes ;
- Les structures exposées à un écoulement d'eau à grande vitesse [19] ;
- Structures fortement hyperstatiques ;
- Structures mixtes armatures-fibres ;
- Structures précontraintes ;
- Dallages industriels, pieux forés, bétons projetés ;
- Structures présentant des difficultés techniques :

- Structures fortement armées ou dont les armatures sont difficiles à mettre en œuvre ;
- Structures aux géométries complexes telles que des coques ;
- Structures soumises à des sollicitations dynamiques ou des séismes [24].

### **II.5.2 Domaine d'utilisation de fibre de verre**

En préfabrication, les domaines d'application des fibres de verre sont très vastes, en particulier pour la réalisation d'éléments de faible épaisseur, esthétiques et légers :

- Panneaux de façade minces ;
- Bardages et éléments décoratifs et architectoniques ;
- Éléments divers : coffrets, coffrages, habillages ;
- Produits d'assainissement : tuyaux, caniveaux ;
- Mobiliers urbains.

Elles permettent de maîtriser en usine de préfabrication, les efforts lors de la manutention des éléments au jeune âge.

Nota : des applications courantes des bétons de fibres de verre sont les bétons dénommés CCV (composite ciment verre) ou, en anglais, GRC (glass reinforced cement) [24].

### **II.5.3 Domaine d'utilisation de fibre de synthétique**

- Les fibres synthétiques sont également utilisées dans le stuc et le mortier [19].

## **CHAPITRE III**

### **RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

### III. Travaux réalisés sur les bétons autoplaçants fibrés

#### III.1 Une étude faite par V. Athiyamaan et G. Mohan Ganesh :

en 2020, Une étude faite sur le thème: « **Analyse expérimentale, statistique et simulation de l'impact des micro-acier - Fibres sur les bétons autoplaçants contenant des adjuvants** » [30].

Les matières premières suivantes ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

1. Ciment Portland ordinaire classe 53 conformément à la norme IS : 12269-1987 ;
2. Cendres volantes acquise auprès de Neyveli Lignite Corporation thermique Centrale électrique, conformément à la norme IS : 3812 : 2003 ;
3. Agrégats fines tamisés avec un tamis de 2,36 mm conformément à la norme IS : 383-1987 ;
4. Agrégats grossiers passé à travers un tamis de 12,5 mm et retenu dans un tamis de 10 mm, conformément à la norme IS : 383-1987 ;
5. Superplastifiant master Glenium SKY 8233 pour améliorer la maniabilité ;
6. Les micro fibres d'acier d'un rapport hauteur / largeur (l /d) de 60 ont été utilisés dans cette étude.

##### III.1.1 Les mélanges réalisés

Les différents mélanges utilisés dans cette étude sont nommés comme suit :

M1/M2/M3/M4/M5/M6/M7/M8

Pour cette étude, la classe de béton M50 a été conçue conformément à la proposition méthode de conception du mélange. La teneur de remplacement du ciment et les proportions des matériaux utilisés dans ce travail sont représentées dans [le tableau III-1](#).

**Tableau III-1:** Teneur de remplacement du ciment et les proportions des matériaux.

Mélanges	Contenu du liant			Contenu variable				Pourcentage de fibre d'acier par volume de béton
	Ciment	Cendres volantes	MSF	Agrégat fin Kg/m <sup>3</sup>	Agrégat grossier Kg/m <sup>3</sup>	W/C	SP	
<b>M1</b>	100%	0%	0%	710	935	0.4	1.70%	0%
<b>M2</b>	60%	30%	10%	710	935	0.4	1.70%	0%
<b>M3</b>	100%	0%	0%	710	935	0.4	1.70%	0.25%
<b>M4</b>	100%	0%	0%	710	935	0.4	1.70%	0.50%
<b>M5</b>	100%	0%	0%	710	935	0.4	1.70%	0.75%
<b>M6</b>	60%	30%	10%	710	935	0.4	1.70%	0.25%
<b>M7</b>	60%	30%	10%	710	935	0.4	1.70%	0.50%
<b>M8</b>	60%	30%	10%	710	935	0.4	1.70%	0.75%

Les proportions de mélange sont réalisées selon la conception de mélange optimisée en utilisant la méthode Nan Su, donnée dans le [tableau III-2](#).

Cela satisfait aux propriétés du SCC selon les directives proposées par EFNARC (European Federation of National Associations Representing for Concrete).

**Tableau III-2:** Proportion des constituants dans le mélange selon la méthode Nan Su.

Liant total kg/m <sup>3</sup>	Agrégat fin kg/m <sup>3</sup>	Agrégat grossier kg/m <sup>3</sup>	Eau kg/m <sup>3</sup>	HRWR kg/m <sup>3</sup> Factor	S/A	Packing Factor
525	710	935	215	8.925	0.56	1.10

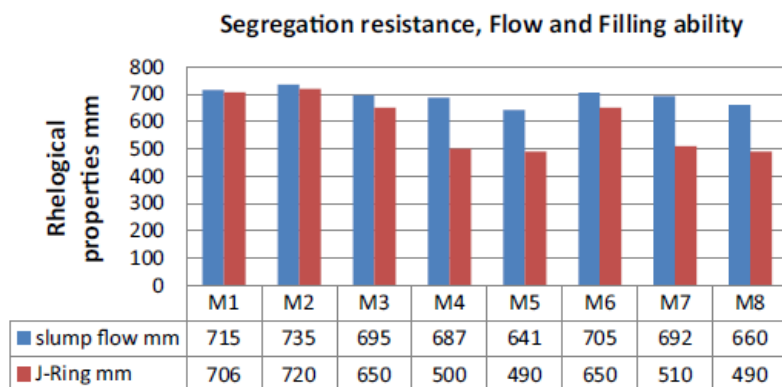
### III.1.2 Résultats et discussion

#### III.1.2.1 Propriétés du béton frais

Les propriétés du béton frais, telles que l'affaissement, L-Box, V-Funnel, J-Ring et T500mm ont été réalisés pour le mélange M1, M3, M4 et M5 et ces résultats ont été comparés à M2, M6, M7 et M8 respectivement.

**Tableau III-3:** Résultat des propriétés rhéologiques.

Mix ID	Slump mm	J-Ring mm	L-Box (H2/H1)	V-Funnel Sec
<b>M1</b> (0%)	715	706	0.85	7
<b>M2</b> (0%)	735	720	0.9	6
<b>M3</b> (0.25%)	695	650	0.74	8
<b>M4</b> (0.50%)	687	500	0.61	9
<b>M5</b> (0.75%)	641	490	0.5	10
<b>M6</b> (0.25%)	705	650	0.77	7
<b>M7</b> (0.50%)	692	510	0.68	8
<b>M8</b> (0.75%)	660	490	0.55	9



**Figure III-1:** Propriétés rhéologiques des différents mélanges.

- Lorsque les mélanges M3, M4 et M5 ont été comparés à M1, il y avait une baisse de 2,8%, 3,92% et 10% de la fluidité respectivement, cela montre que l'ajout de fibres d'acier affecte (réduit) les propriétés rhéologiques du béton autoplaçant (SCC) ;
- Des résultats similaires ont été trouvés dans le mélange M6, M7 et M8. Dans les deux cas, il y a eu une chute brutale du débit pour les mélanges M5 et M8, contenant 0,75% de fibres d'acier ;
- Bien que les résultats s'inscrivent dans les prémisses des directives EFNARC, il est essentiel de déterminer le contenu fibreux optimal. Bien que les mélanges M5 et M8 contenant 0,75% de micro-fibres d'acier présentent une fluidité conforme aux directives EFNARC, ils présentent une faible capacité de remplissage et de passage. Ceci est considéré comme un critère important pour les structures en béton armé. Par conséquent, 0,5% a été considéré comme le meilleur rapport de mélange.

### III.1.2.2 Résistance à la compression

Le tableau III- 4 représente les résultats des essais mécaniques des différents mélanges réalisés.

**Tableau III-4:** Résultats des essais mécaniques des différents mélanges réalisés.

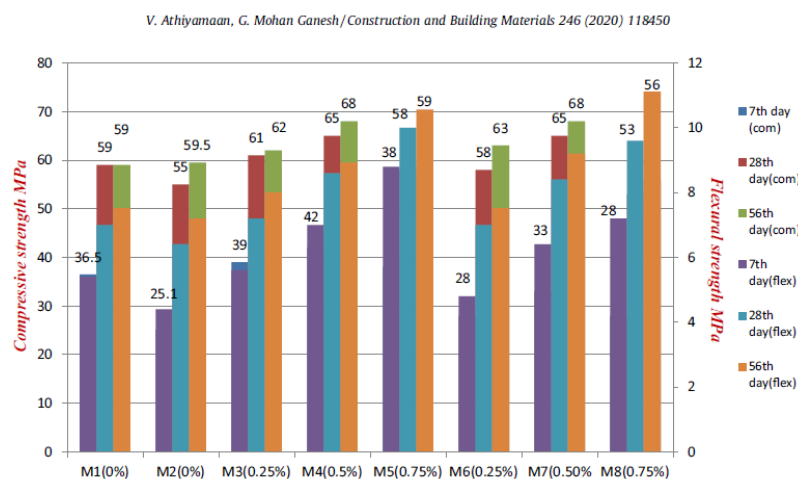
Mélanges &% Fibres	Résistance à la compression Mpa			Résistance à la flexion MPa			Résistance à la traction divisée Mpa		
	7J	28J	56J	7J	28J	56J	7J	28J	56J
<b>M1 (0%)</b>	36,5	59	59	5,4	7	7,5	3,121	4,395	4,459
<b>M2 (0%)</b>	25,1	55	59,5	4,4	6,4	7,2	3,408	4,204	4,618
<b>M3 (0.25%)</b>	39	61	62	5,6	7,2	8	3,471	4,522	4,618
<b>M4 (0.5%)</b>	42	65	68	7	8,6	8,9	3,79	4,713	4,777
<b>M5 (0.75%)</b>	38	58	59	8,8	10	10,6	3,981	5,159	5,191
<b>M6 (0.25%)</b>	28	58	63	4,8	7	7,52	2,93	4,459	4,777
<b>M7 (0.50%)</b>	33	65	68	6,4	8,4	9,2	3,185	4,682	4,936
<b>M8 (0.75%)</b>	28	53	56	7,2	9,6	11,1	3,408	5	5,318

- Lorsque la teneur totale en liant est remplacée par 30% de cendres volantes et 10% de fumée de silice, il y a une diminution de la résistance à la compression du mélange M2, M6, M7 et M8 par rapport à M1, M3, M4 et M5 respectivement pendant les premiers jours (7 jours). Cela était dû à la présence de cendres volantes. Mais la résistance à la compression du mélange M2, M6, M7 et M8 était supérieure à celle du mélange M1, M3, M4 et M5 au 56e jour de durcissement, montrant que le processus d'hydratation se poursuivait, même après 28 jours de durcissement ;

- L'incorporation de micro-fibres d'acier n'a pas montré de changements de résistance à la compression. Il y avait une légère amélioration de la résistance de M3 et M4 par rapport à M1 ; M6 et M7 par rapport à M2 respectivement ;
- L'ajout de 0,25 % de microfibrilles d'acier a montré 8% et l'ajout de 0,50 % a montré 16% de gain de résistance à la compression par rapport à un mélange contenant 0% de fibres d'acier ;
- Il y avait une chute soudaine de la résistance à la compression de 10% dans M5 et M8 dans tous les jours de séchage par rapport à M1 et M8. On a vu que l'ajout de fibres d'acier au-delà de 0,50 % tend à réduire la résistance à la compression du béton en raison du pourcentage élevé de fibres.

### III.1.2.3 Résistance à la flexion

La figure III-2 représente une comparaison entre la résistance mécanique à la compression et la résistance mécanique à la flexion des différents mélanges élaborés.



**Figure III-2:** Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression et à la flexion.

- L'ajout des fibres d'acier a amélioré le comportement en flexion du béton, empêchant le béton de se rompre brutalement par rupture fragile et permettant à l'éprouvette de supporter la charge même après l'apparition de la fissure initiale ;
- Comme pour la résistance à la compression, des résultats similaires ont été observés pour la résistance à la flexion entre M1 et M2, c'est-à-dire une baisse de la résistance à l'âge initial (résistance à 7 jours) ;
- Une augmentation linéaire de la résistance avec l'ajout de micro fibres d'acier a été observé, lorsque le mélange M1 (0,00%) est comparé avec M3 (0,25%), M4 (0,50%) et M5 (0,75%). Les mêmes résultats ont été trouvés lorsque le mélange M2 (0,00%) est comparé à M6 (0,25%), M7 (0,50%) et M8 ;

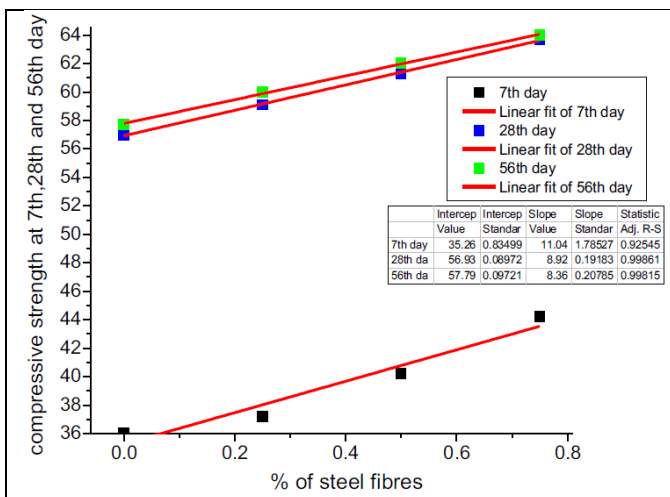
- La teneur en microfibres d'acier est directement proportionnelle à la résistance à la flexion. L'ajout de 0,75% de fibres d'acier a montré une augmentation de la résistance jusqu'à 63% par rapport à M1 et M2.

### III.1.2.4 Analyses statistiques

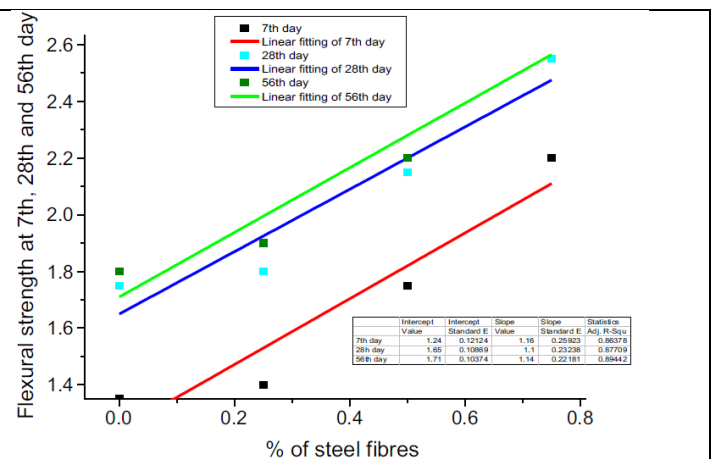
C'est la méthode traditionnelle d'analyse des équations de variance et de régression linéaire pour extraire le modèle parfait pour la prédiction du comportement du modèle expérimental développé, pour une meilleure recherche à l'avenir dans ce domaine. C'est l'un des modèles efficaces qui permet d'interagir visuellement et d'analyser les données obtenues ;

C'est l'une des approches mathématiques permettant d'examiner la qualité des données et de classer les échantillons en conséquence. Dans l'étude, la résistance à la compression et la résistance à la flexion en fonction de l'âge (jours) respectifs ont été considérées comme des réponses. Une teneur en pourcentage variable de 0,00%, 0,25%, 0,50% et 0,75% avait été considérée comme une variable ;

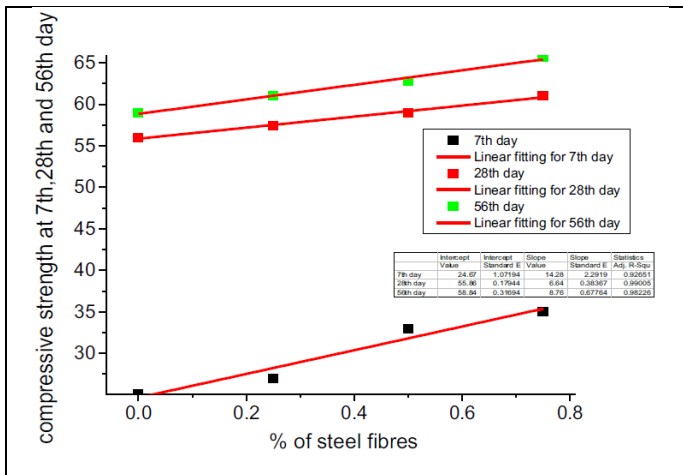
Les échantillons contenant uniquement du ciment, c'est-à-dire M1, M3, M4 et M5, avaient été considérés comme un seul modèle et les échantillons contenant des ajouts minéraux, c'est-à-dire M2, M6, M7 et M8 avaient été considérés comme un deuxième modèle. En conséquence, des équations de régression ont été développées en utilisant un traitement par ajustement linéaire. Les résultats des analyses ont été présentés sur les figures III-3, III-4, III-5 et III-6.



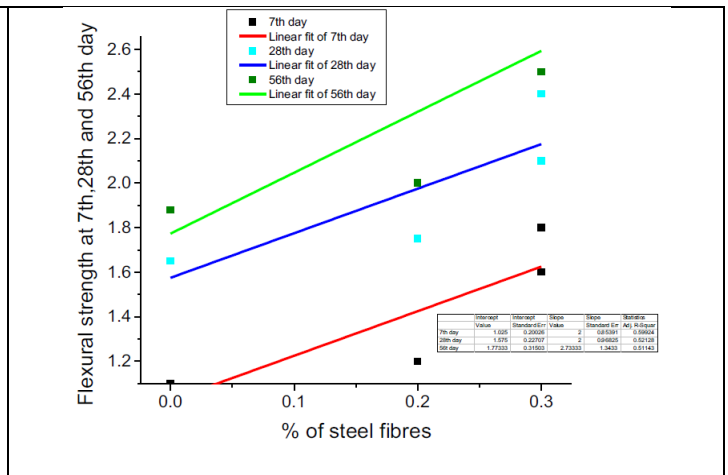
**Figure III-3:** Résistance à la compression avec les fibres d'acier respectives.



**Figure III-4:** Résistance à la flexion avec les fibres d'acier respectives.



**Figure III-5:** Résistance à la compression avec les fibres d'acier respectives.



**Figure III-6:** Résistance à la flexion avec les fibres d'acier respectives.

**III.1.2.5 Résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres d'acier (mélanges M1, M3, M4 et M5)**

Une courbe d'ajustement linéaire a été développée entre la résistance à la compression du 7ème jour, du 28ème jour et du 56ème jour avec un pourcentage variable de fibres d'acier (0,00%, 0,25%, 0,50% et 0,75%).

Sur la figure III-3, on voit clairement que tous les points de résistance à la compression se situent dans la ligne droite de la courbe, montrant qu'il existe une bonne corrélation entre la variable (% de fibres d'acier) et les réponses (résistance à la compression).

Par conséquent, les meilleures réponses prédites et les valeurs des coefficients de corrélation ( $r^2$ ) estimées sont indiquées dans les équations : (1), (2) et (3).

Pour 7jours  $y = 11,04x + 35,26, r^2 = 0,925$  (1)

Pour 28jours  $y = 8,92x + 56,93, r^2 = 0,99$  (2)

Pour 56 jours  $y = 8,36x + 57,79, r^2 = 0,99$  (3)

**III.1.2.6 Résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres d'acier respectivement (mélanges M1, M3, M4 et M5)**

De même, les équations de régression sont dérivées avec respectivement les réponses (résistance à la flexion de plusieurs jours) « y » et la variable « x ». La corrélation entre y et x est significative, cela peut être vérifié par les valeurs des coefficients de corrélation «  $r^2$  ». Les meilleures réponses prédites et les valeurs  $r^2$  estimées sont indiquées dans les équations : (4), (5) et (6).

Pour 7 jours  $y = 1.16x + 1.24, r^2 = 0,863$  (4)

Pour 28 jours  $y = 1.1x + 1.65, r^2 = 0,877$  (5)

Pour 56 jours  $y = 1.14x + 1.71, r^2 = 0,894$  (6)

### III.1.3 Conclusion

À partir des résultats et discussions les conclusions suivantes ont été tirées :

- Les propriétés à l'état frais et durcies du béton autoplaçant contenant des micro-fibres d'acier et des ajouts minéraux ont été évaluées avec leurs mélanges témoins respectifs.
- L'augmentation des micro-fibres d'acier affecte la capacité d'écoulement et de remplissage du béton autoplaçant renforcé par des micro-fibres d'acier.
- L'ajout de 0,50% de fibres d'acier (M4 et M7) a montré une meilleure résistance à la compression par rapport aux autres mélanges (M1, M2, M3, M5, M6 et M8). En outre, les mélanges (M4 et M7) ont montré de meilleures propriétés rhéologiques par rapport à (M5 et M8).
- L'augmentation des micro-fibres d'acier augmente la résistance à la flexion du béton, jusqu'à 50% -60% et empêche le béton de se rompre par une rupture fragile.
- Le processus d'hydratation se poursuit avec un mélange contenant des ajouts minéraux même après 28 jours de durcissement. Cela se voit dans le gain de la résistance mécanique pour M2, M6, M7 et M8 à 56 jours par rapport à M1, M3, M4 et M5.

### III.2 Une étude faite par Paulo A. L. Fernandes · João Veludo · Nuno Almeida · João Baptista · Hugo Rodrigues :

En 2018, une étude faite sur le thème « **Etude d'un béton autoplaçant fibré pour une application dans l'industrie de préfabrication** » [31].

Le [tableau III-5](#) représente les matières premières qui ont été utilisées dans le cadre de ce travail.

**Tableau III-5:** Matériaux constitutifs du béton.

Material	Description
<b>Ciment Portland</b>	CEM I - 42,5R (3150 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Agrégats grossiers 1</b>	Calcaire N°1: 6.3/12.5 mm (densité : 2.69 kg/l)
<b>Agrégats grossiers 2</b>	Calcaire N°0.5: 2/6.3 mm (densité : 2.69 kg/l)
<b>Sable 1</b>	Sable de rivière 0/4 mm (densité : 2.59 kg/l)
<b>Sable 2</b>	Sable des dunes 0/2 mm (densité : 2.58 kg/l)
<b>Adjuvant 1 (Superplastifiant)</b>	Sika Viscocrete 20HE (polycarboxylate ether-based)
<b>Adjuvant 2 (Superplastifiant)</b>	BASF MasterGlenium SKY 526 (polycarboxylate ether-based)
<b>Fibre 1</b>	Fibre d'acier à extrémité crochue 35/0.75 (l/d = 46.7)
<b>Fibre 2</b>	Polypropylène Fibre (l = 12 mm, d = 31 µm)
<b>Les Fines</b>	Poudre de calcaire (densité : 2720 kg/m <sup>3</sup> )

### III.2.1 Formulation des différents mélanges du béton

Il existe différentes méthodes pour obtenir un béton autoplaçant, comme indiqué par Shi et al. [32] sur la base de différents paramètres :

- (i) Méthode de conception empirique ;
- (ii) Méthode de formulation utilisant la résistance à la compression ;
- (iii) Méthode de remplissage des agrégats ;
- (iv) Méthode de conception de mélange basée sur le modèle factoriel statistique ;
- (v) Méthode de conception de mélange basée sur le modèle rhéologique de la pâte.

Il est difficile de comparer l'efficacité de différentes méthodes en raison de leurs paramètres de conception spécifiques. Comme indiqué par Shi et al.[32], la méthode de conception empirique est caractérisée en faisant plusieurs mélanges d'essai, en ajustant les quantités des différents constituants(matériaux cimentaires, eau, superplastifiant, agrégats grossiers et fins)déterminer les proportions initiales du mélange. Okamura a utilisé cette méthode en fixant les teneurs en granulats grossiers et fins, puis ajuster le rapport eau/poudre et le dosage du superplastifiant. Même si c'est une méthode facile à suivre, elle nécessite un test de laboratoire.

Puisqu'il n'y a pas de méthode de conception optimale et en raison des besoins spécifiques de cette étude, impliquant l'industrie du béton préfabriqué, les principes suivants, qui comprenaient divers aspects des méthodes susmentionnées, ont été utilisés pour guider la formulation du béton autoplaçant renforcé par des fibres (SCFRC) :

- La taille maximale des agrégats était limitée à 15 mm en raison à la dimension du panneau ;
- Utilisation d'agrégats à large gamme granulométriques pour maximiser la compacité et le comportement autoplaçant du béton ;
- Adoption d'un faible rapport eau / ciment (E/C) ;
- Utilisation d'un superplastifiant de troisième génération pour une meilleure fluidité et maniabilité ;
- Ajout de fibres d'acier pour améliorer les propriétés mécaniques béton.

Pour la composition de base de béton autoplaçant, il était adopté un dosage de  $600 \text{ kg/m}^3$  de liant constitué d'un mélange de poudre de ciment et de calcaire (charge). Plus la quantité de liant est élevée plus le retrait est important, donc l'utilisation de fibres aidera à contrôler cet effet secondaire.

Pour augmenter la fluidité et la résistance mécanique du béton, il a été décidé d'utiliser un superplastifiant comme agent réducteur d'eau pour diminuer un rapport E/C.

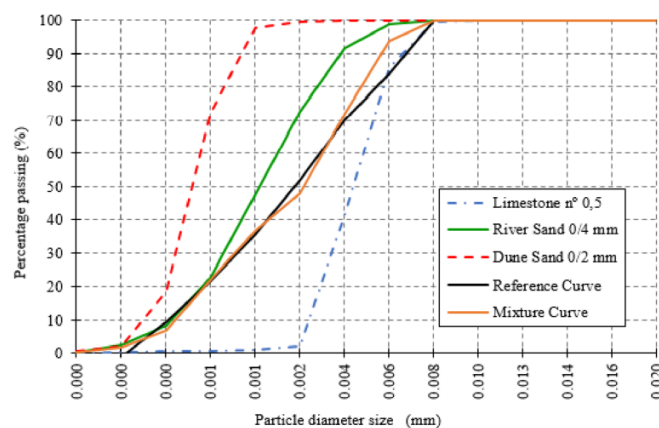
Le béton doit présenter des caractéristiques telles qu'une bonne fluidité, une homogénéité et une ouvrabilité élevées à l'état frais, une fois durci, il doit avoir une résistance à la compression élevée à un jeune âge, obtenues principalement par un faible rapport E/C, des fibres et une compacité élevée.

### III.2.2 Les mélanges réalisés

La réalisation des mélanges de béton ont été divisés en deux étapes:

- **Étape 1** : Développement d'un béton autoplaçant avec une résistance à la compression élevée à jeune âge ; une bonne fluidité et sans ségrégation ;
- **Étape 2** : utilisation du béton autoplaçant le plus approprié obtenu à l'étape 1, comme béton de base, ajout de fibres pour obtenir un du béton autoplaçant renforcé avec des fibres (SCFRC) aux propriétés mécaniques améliorées.

Les proportions de mélange ont été obtenues en utilisant la courbe granulométrique de référence de Faury, comme présenté dans [figure III-7](#). Les paramètres A et B de Faury ont été pris égal à 44 et à 2, respectivement. L'objectif était d'obtenir une densité élevée, une meilleure capacité de passage et une bonne fluidité sans ségrégation.



**Figure III-7:** Courbes granulométriques des agrégats utilisés.

Dans [le tableau III-6](#) sont présentés les constituants de chaque mélange de béton autoplaçant.

**Tableau III-6:** Constituants de chaque mélange de béton autoplaçant de l'étape 1.

Matériaux	Mélange SCC.1	Mélange SCC.2	Mélange SCC.3	Mélange SCC.4	Mélange SCC.5
Ciment ( $\text{kg/m}^3$ )	400.0	400.0	400.0	500.0	500.0
Poudre de calcaire ( $\text{kg/m}^3$ )	200.0	200.0	200.0	100.0	100.0
Eau ( $\text{l/m}^3$ )	170.9	155.0	155.0	150.9	155.0
Agrégat grossier (2/6.3 mm) ( $\text{kg/m}^3$ )	657.0	699.0	700.0	709.0	705.0

Sable de rivière (0/4 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	613.0	644.0	645.0	621.0	620.0
Sable de dune (0/2 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	262.0	292.0	293.0	329.0	324.0
MasterGlenium SKY 526 (l/m <sup>3</sup> )	6.0	7.5	6.7	7.5	7.5

Le tableau III-7 présente les différents paramètres pour chaque mélange de BAP de l'étape 1.

**Tableau III-7:** Différents paramètres pour chaque mélange de BAP de l'étape 1.

Mélanges	(W + SP)/C	(W+SP)/(liant)	SP (%)	Gros /agrégats fins (vol.)	Compacité
SCC.1	0.44	0.29	1.6	0.39	0.808
SCC.2	0.41	0.27	2.0	0.39	0.823
SCC.3	0.40	0.27	1.8	0.39	0.823
SCC.4	0.32	0.26	1.6	0.38	0.827
SCC.5	0.33	0.27	1.6	0.38	0.823

**W** : l'eau, **SP** :superplastifiant, **C** : ciment.

Pour l'étape 2, un mélange de béton autoplaçant (SCC) de l'étape 1 a été choisi comme référence pour commencer à développer le béton autoplaçant renforcé par des fibres (SCFRC), car il a présenté un bon écoulement, sans ségrégation, combiné avec une résistance à la compression élevée obtenue au jeune âge. Dans le tableau III-8 sont présentés les constituants pour chaque mélange de béton autoplaçant renforcé par des fibres (SCFRC).

**Tableau III-8:** Constituants de chaque mélange de BAPF(SCFRC) de l'étape 2.

Matériaux	Mélange SCFRC.1	Mélange SCFRC.2	Mélange SCFRC.3	Mélange SCFRC.4	Mélange SCFRC.5
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Poudre de calcaire (kg/m <sup>3</sup> )	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Eau(l/m <sup>3</sup> )	150.0	160.0	148.0	160.0	155.0
gros aggregate (2/6.3 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	501.0	505.0	513.0	505.0	507.0
Sable de rivière (0/4 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	1023.0	1003.0	1013.0	1002.0	1004.0
Sable de dune (0/2 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	131.0	125.0	136.0	124.0	127.0
SP MasterGlenium SKY 526 (l/m <sup>3</sup> )	0.0	6.08	7.00	7.00	9.35
SP Sika viscocrete 20HE (l/m <sup>3</sup> )	11.2	0.00	0.00	0.00	0.00
Fibre d'acier (L/d = 35/0.75) (kg)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0

Le tableau III-9 représente les différents paramètres pour chaque mélange de béton autoplaçant renforcé par des fibres (SCFRC) de l'étape 2.

**Tableau III-9:** Différents paramètres pour chaque mélange de béton (SCFRC) de l'étape 2.

Mélanges	(W+SP)/C	(W + SP)/ (liant)	SP (%)	Gros /aggregats fins (vol.)	Compacité
SCFRC.1	0.32	0.27	2.4	0.40	0.824
SCFRC.2	0.33	0.28	1.3	0.40	0.819
SCFRC.3	0.31	0.26	1.5	0.40	0.830
SCFRC.4	0.33	0.28	1.5	0.40	0.818
SCFRC.5	0.33	0.27	2.0	0.40	0.821

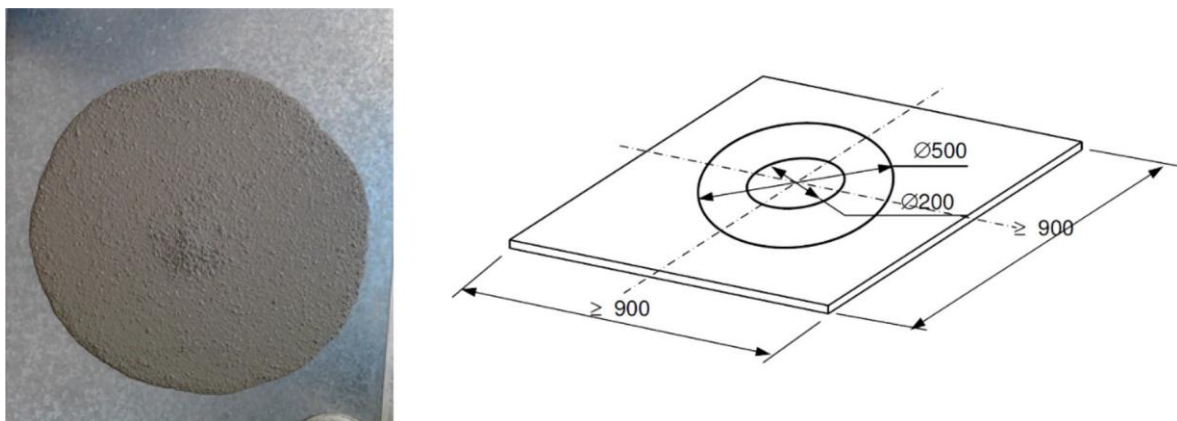
W: l'eau, SP: superplastifiant, C: ciment.

### III.2.3 Éprouvettes et configuration de test

Le béton frais a été évalué par une série d'essais. Pour évaluer sa fluidité (capacité de remplissage), sa capacité à franchir des obstacles (par exemple : renforcement, irrégularités et tuyauterie) et sa résistance à la ségrégation.

L'essai d'étalement (EN 12350-8, 2010 [33]) a été utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité relative de chaque mélange, comme le montre la Figure III-8.

La résistance moyenne à la compression du béton durci a été obtenue conformément à la norme EN 12390-3 (2009) [34] à 1,7 et 28 jours.



**Figure III-8:** essai d'étalement.

### III.2.4 Résultats et discussions

- Avec un petit ajustement du dosage du superplastifiant et rapport eau/ciment, il a été possible d'obtenir un mélange de béton autoplaçant avec une bonne fluidité, ayant un étalement de 775 millimètres, tout en maintenant une résistance à la compression très élevée dès jeune âge qui permet d'accélérer les cycles de production.

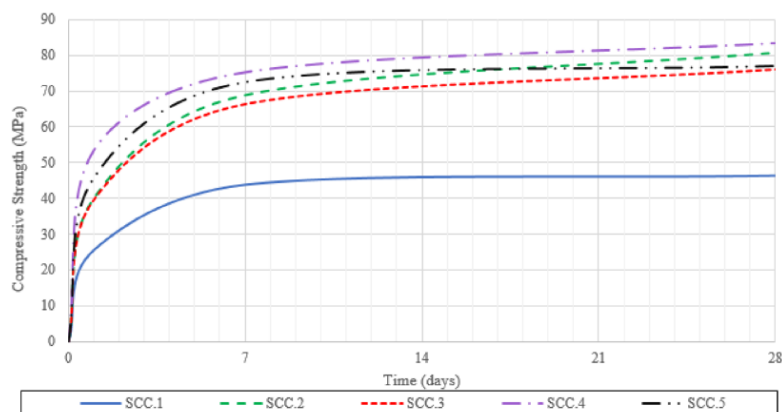
- Des essais préliminaires, il a été conclu que le béton autoplaçant SCC.4 était le mélange le plus adapté pour démarrer les tests paramétriques avec les fibres d'acier, comme indiqué dans le [tableau III-10](#) et la [Figure III-9](#).

Le dosage des fibres a été déterminé par la quantité de ciment dans le mélange, soit 5% en poids de ciment pour les fibres d'acier et 0,5% pour les fibres de propylène.

**Tableau III-10:** La résistance à la compression à différents âges des mélanges de l'étape 1.

Mélanges	Étalement (mm)	Rc (1j) (MPa)	Rc(7j) (MPa)	Rc(28j) (MPa)
SCC.1	537	25.47	43.65	46.19
SCC.2a	780	40.00	68.80	80.66
SCC.3a	790	39.60	66.35	76.05
SCC.4	775	53.40	75.17	83.31
SCC.5a	775	45.78	72.53	77.06

a : Ségrégation a été observée.



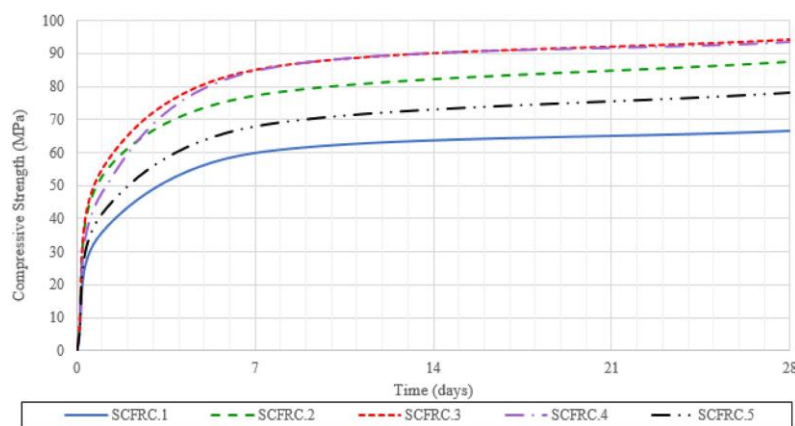
**Figure III-9:** Résistance à la compression du béton autoplaçant (SCC) dans le temps.

- Les fibres synthétiques réduisent considérablement le comportement autoplaçant obtenu dans les mélanges précédents, ils ont donc été rejetés pour la suite. Le [tableau III-11](#) et la [figure III-10](#) montrent les résultats de mélanges de béton autoplaçant renforcé par des fibres (SCFRC) de l'étape 2, avec des fibres d'acier uniquement. Tous les mélanges de béton autoplaçant, à l'exception de SSC.1, ont montré un comportement similaire à la fois à l'état frais et durci. Le béton autoplaçant SCC.4 est le mélange le plus approprié grâce à un bon étalement, avec une bonne qualité de surface des cylindres élaborés, ainsi qu'une grande résistance mécanique à la compression à jeune âge.

**Tableau III-11:** La résistance à la compression à différents âges des mélanges de l'étape 2.

Mélanges	Fluidité du mélange (mm)	Résistance à la compression (1 j) (MPa)	Résistance à la compression (7 j) (MPa)	Résistance à la compression (28j)(MPa)
SCFRC.1	700	36.17	60.00	66.67
SCFRC.2	500	53.03	77.33	87.58
SCFRC.3	650	55.17	85.00	94.17
SCFRC.4	720	48.13	84.77	93.50
SCFRC.5a	730	41.60	67.80	78.00

a : ségrégation a été observée

**Figure III-10:** Résistance à la compression du SCFRC au fil du temps.

- L'utilisation du ciment CEM I, permet un développement rapide de la résistance à la compression dans les premières 24 heures, avec un maximum de 53,4 MPa. Après 7 jours, il y a une augmentation moyenne de 60% de la résistance par rapport à l'âge de 24 heures, et 12% à 28 jours par rapport à 7 jours, il peut atteindre jusqu'à 83,31 MPa;
- Après l'ajout des fibres, il y a eu une diminution de maniabilité de mélange à l'état frais, avec une diminution de l'étalement. Cependant, malgré cette perte de performance, les mélanges présentaient toujours une bonne fluidité;
- La résistance mécanique à la compression du béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques (SCFRC) augmentait d'environ 13% par rapport au béton autoplaçant (SCC) ordinaire.

### III.2.5 Conclusion

Quelques paramètres importants dans les performances de béton autoplaçant ont été évalués tels que : le rapport G/S; dosage en ciment ; la compacité et les paramètres de la courbe de Faury, nous a permis de faire les conclusions suivantes :

- Le dosage du liant ( $600 \text{ kg/m}^3$ ) est adéquat pour obtenir la résistance et la fluidité nécessaire. Le rapport G/S des agrégats approprié pour obtenir un béton autoplaçant « SCC » (avec ou sans fibres) est d'environ 0,38;
- La compacité doit être comprise dans l'intervalle  $[0,82 \div 0,83]$  et les paramètres les plus appropriés de la courbe de Faury sont :  $A = 44$  et  $B = 2$ ;
- Le bon écoulement obtenu lors des essais d'étalement ont montré que ce béton peut être utilisé dans des formes de coffrage complexes et / ou avec un niveau d'obstructions (par exemple, tuyauteries et armatures);
- Avec ces paramètres, il était possible d'atteindre une résistance à la compression de 55 MPa à 24 heures ainsi que 94 MPa à 28 jours;
- La petite quantité de fibres métalliques utilisées dans ces compositions n'affectaient pas la maniabilité et augmentaient la résistance mécanique à la compression de 13% ;
- Des dosages de fibres plus élevés peuvent et devraient être utilisés pour améliorer la résistance mécanique à la traction, la ductilité et le contrôle de la propagation des fissures;

### III.3 Une étude faite par T. Simões et al. :

En 2018, une étude faite sur le thème « **Influence du type et du dosage des microfibrilles sur les propriétés physiques des matrices de mortier renforcées de fibres** » [35].

Les matières premières suivantes ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

1. Ciment CEM II / A-L 42.5R.
2. Fines calcaire.
3. Superplastifiant de troisième génération (à base d'étherpolycarboxylates)
4. L'eau.
5. Sable siliceux (0/4 mm), séché à l'étuve.
6. les fibres en acier (Dramix OL 13/.20), de polypropylène (Vimafibre 512) ou en verre (Vimacrack).

Les propriétés des fibres correspondantes sont répertoriées dans [le tableau III-12](#):

**Tableau III-12:** propriétés Principales de toutes les fibres utilisées.

Type de fibre	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Densités pécifique	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Dramix_OL 13/20	200	13	7.84	200	2600
Vimafibre 512	34-45	12	0.91	3.5-4.0	340-400
Vimacrack	14	12	2.68	72	1700

**Tableau III-13:** Montre la composition finale pour chaque cas.

Mélanges	Constituants							
	CEM II/A-L 42.5R	Fines de calcaire*	Eau	BASF Glenium Sky 526	Sable Moyne	Fibres*		
						St	Po	Gl
Reference	475.0	285.0	197.6	6.2	1340.6	-	-	-
St 0.5					1327.7	39.3	-	-
St 1.0					1314.8	78.5		
St 1.5					1301.1	117.8		
St 2.0					1288.2	157.0		
Po 0.5					1327.7	-	4.6	-
Po 1.0					1314.8		9.1	
Po 1.5					1301.1		13.7	
Po 2.0					1288.2		18.2	
Gl 0.5					1327.7	-	-	13.4
Gl 1.0					1314.8			26.8
Gl 1.5					1301.1			40.2
Gl 2.0					1288.2			53.6

«St» : Fibre d'acier, «Po»: Fibre polypropylène et «Gl» : Fibre de verre.

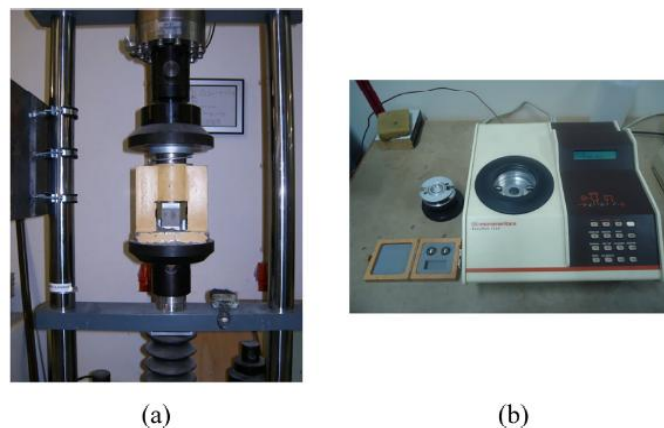
### III.3.1 Les mélanges réalisés

Les mélanges renforcés par des fibres ont été réalisés en mélangeant d'abord les constituants du mélange de référence (ciment, charge, sable, eau, superplastifiant), puis en ajoutant progressivement les fibres, et enfin en mélangeant le tout jusqu'à atteindre une texture homogène (Figure III-11). Ensuite, les éprouvettes ont été coulées et le coffrage a été retiré après 24 heures. Enfin, les échantillons ont été durcis dans l'eau à  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ , puis retirés et séchés environ 24 heures avant la réalisation des essais mécaniques.

Six échantillons supplémentaires ont été produits avec le mélange de référence pour évaluer la résistance à la compression du mortier à 28 jours (Figure III-12). Une valeur moyenne de 67,7 MPa et un écart type de 2,8 MPa ont été trouvés.



**Figure III-11:** Procédure de mélange: (a) avant; et (b) après avoir ajouté les fibres.



**Figure III-12:** (a) Essais de compression des échantillons de mélange de référence;  
(b) pycnomètre à hélium.

### III.3.2 Résultats et discussions

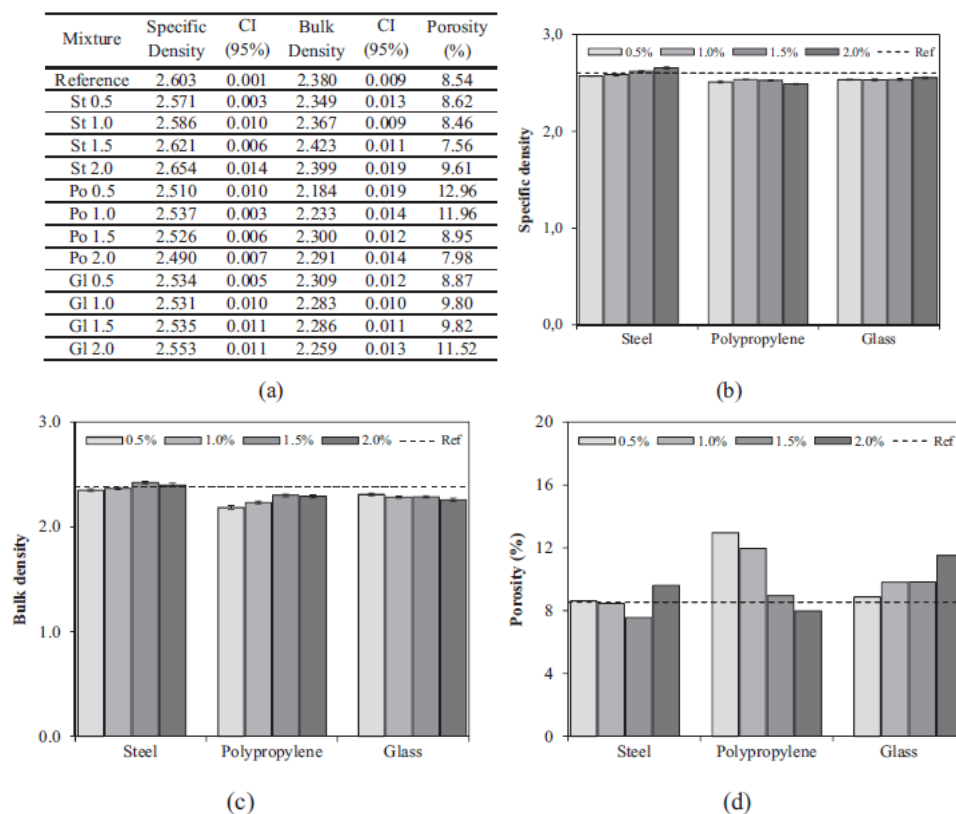
Les résultats concernant l'ouvrabilité, la densité, la porosité et le module de Young sont présentés et discutés.

#### III.3.2.1 Ouvrabilité, densité et porosité

- Pendant le malaxage, la réduction de l'ouvrabilité était remarquable pour les mélanges réalisés avec des fibres de polypropylène et des fibres de verre. Le mélange de référence et les mélanges renforcés de fibres d'acier présentent une fluidité autoplaçante, par contre les mélanges renforcés avec des fibres de polypropylène et des fibres de verre présentent une consistance plastique, Cette réduction d'ouvrabilité peut être attribuée au nombre élevé de fibres dans ces mélanges, créant un squelette dense et affectant la rhéologie et les mouvements d'écoulement interne de la matrice cimentaire à l'état frais.
- Les densités spécifiques et apparentes et la porosité, les intervalles de confiance (IC) à 95% sont indiquées sur la figure III-13a et tracés sur les figures III-13b – d. Pour chaque type de fibre, la densité spécifique augmente proportionnellement avec le dosage en fibres (voir Figure III-13b). Le mélange de référence a une densité spécifique de 2,60, en

présence de fibres d'acier on remarque que la densité spécifique augmenté, allant de 2,57 à 2,65 (selon le dosage), et elle diminue en présence des fibres polypropylène, allant de 2,54 à 2,49 (pour 1,0 et 2,0% respectivement).

Dans le cas des fibres de verre, la densité spécifique augmente légèrement par rapport au mélange de référence, la densité apparente a diminué lorsque les fibres de polypropylène ou les fibres de verre ont été ajouté au mélange de référence.

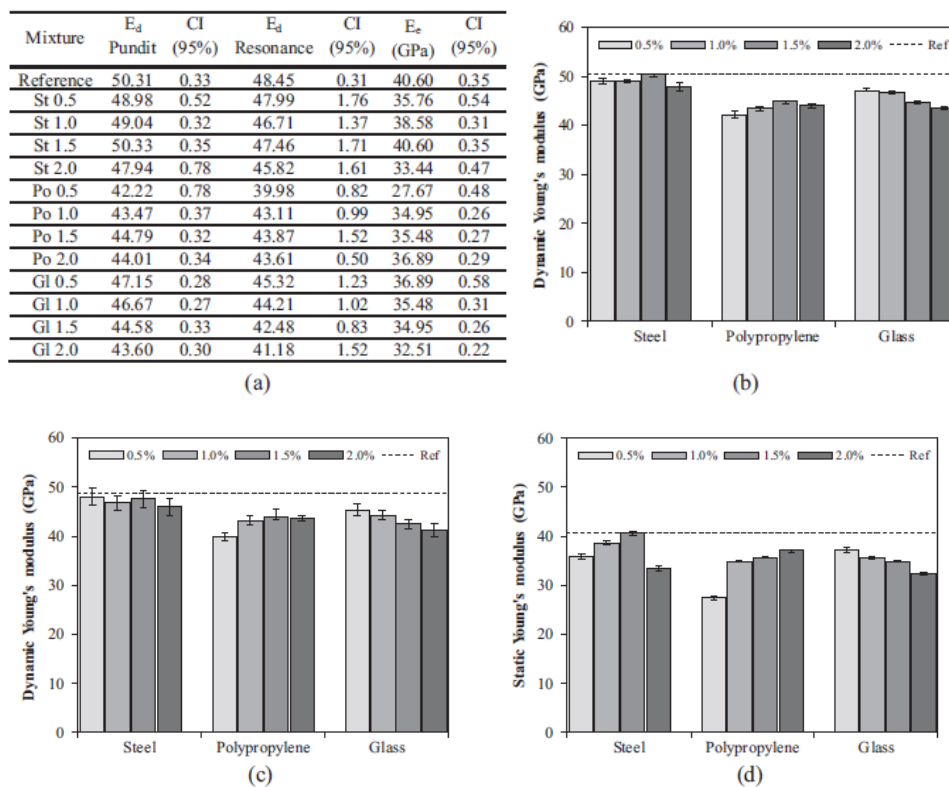


**Figure III-13:** (a) Tableau contenant les densités moyennes et la porosité pour tous les mélanges; et graphiques correspondants pour (b) la densité spécifique; (c) densité apparente; et (d) la porosité.

### III.3.2.2 Module de Young et résistance à la compression

Les résultats concernant le module de Young dynamique et statique, les intervalles de confiance (IC) à 95% sont représentés sur la figure III-14 a et tracés sur la figure III-14 b – d. D'une manière générale, les résultats dynamiques obtenus en utilisant la méthode de résonance présentent une variabilité plus élevée que celles obtenues avec la méthode Pundit. Cependant, les valeurs moyennes des deux méthodes sont assez similaires (car on peut vérifier en comparant par exemple figure III-14 b et c). Il faut noter que les tendances sont très similaires dans les deux méthodes. Cependant, les valeurs de la méthode de résonance sont toujours inférieures à ceux de Pundit méthode. Bien que ces deux méthodes évaluent la Module de Young dynamique, le phénomène physique associé à chacun l'un est différent.

Alors que la méthode Pundit est basée sur la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore dans un solide, la méthode de résonance est basée sur la fréquence de vibration d'un solide. Pour les calculs utilisés dans la méthode de résonance, le coefficient de Poisson doit être admis et dans cette étude, une valeur de 0,2 a été choisie. Si le coefficient de Poisson réel est légèrement différent, le résultat sera affecté et ceci explique la différence entre les résultats obtenus pour les deux méthodes. Cependant dans le ciment la méthode Pundit est la plus couramment utilisée et la méthode de résonance a été utilisée pour faire une étude comparative.



**Figure III-14:** (a) Tableau contenant le module de Young dynamique et statique moyen pour tous les mélanges; et des graphiques correspondants pour (b) le module dynamique (pundit); (c) module dynamique (résonance); et (d) module statique.

- Le module de Young dynamique était toujours supérieur au module correspondant mesuré en statique;
- Pour le mélange de référence, les modules de Young statique et dynamique (obtenus avec la méthode Pundit) sont 40,77 et 50,31 GPa, respectivement. Par rapport au mélange de référence, presque tous les mélanges renforcés présentent un module de Young inférieur;

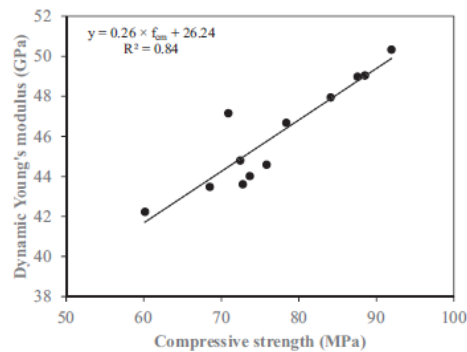
- Pour les fibres d'acier, le module de Young dynamique (obtenu avec la méthode Pundit) est proche de la valeur mesurée dans le mélange référence, sauf pour le dosage le plus élevé où une réduction de 5% (par rapport au mélange de référence) est observée;
- Le module d'élasticité ne semble pas changer de manière significative avec la présence de fibres d'acier;
- Dans le cas des fibres de polypropylène, la réduction est beaucoup plus élevée, atteignant près de 16% pour le dosage le plus faible. Pour les autres dosages, le module dynamique augmente légèrement jusqu'à un dosage de 1,5% ;
- Dans le cas des fibres de verre, le module de Young dynamique diminue avec le dosage des fibres, de 47,15 à 43,60 GPa, ce qui représente une réduction de 6% et 13% respectivement par rapport au mélange de référence ;
- Des conclusions similaires peuvent être tirées pour le module de Young statique, bien que dans ce cas, la réduction soit nettement plus élevée. Pour exemple, il y a une réduction en moyenne 2,5%, 13% et 9,5% de module de Young dynamique, pour les fibres d'acier, les fibres de polypropylène et de verre comparé au mélange de référence, alors que le module statique diminue en moyenne de 8,5, 17 et 14%, respectivement. Ce paramètre semble lié à la porosité. Dans ce cas, l'évolution se fait dans le sens inverse de la porosité ;

L'orientation des fibres peut avoir un effet sur les résultats expérimentaux car le module statique est mesuré dans une direction des éprouvettes et la quantité de fibres orientées dans cette direction peut influencer le résultat. Les valeurs obtenues suggèrent que la dispersion des fibres est acceptable. Les résistances à la compression et à la flexion, sont illustrées à la [figure III-15 a](#), où  $f_{cm}$  est la force moyenne de compression du mortier. Ces paramètres ont été utilisés pour corréler la force de compression et le module de Young dynamique, représentés sur la [figure III-15 b](#). On peut constater qu'une ligne de tendance linéaire peut être utilisée pour prédire le module de Young dynamique à partir de la résistance à la compression avec un degré de précision acceptable ( $R^2 = 0,84$ ). La résistance à la compression a tendance d'augmenter avec l'augmentation de l'addition de fibres.

- Pour les fibres de polypropylène, la résistance trouvée est inférieure de 10% par rapport à la résistance du mélange de référence avec un dosage de 0,5% de fibres, tandis que tous les autres renforts avec les différents pourcentages montrent des résistances plus élevées ;

- Pour les fibres de verre, la force était toujours plus élevée par rapport au mélange de référence. Cependant, les fibres d'acier sont celles qui influencent le plus la résistance à la compression, avec une augmentation d'environ de 30% pour un dosage de 1,5% de fibres.

Mixture	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (kN)
Reference	67.72	5.25
St 0.5	87.58	5.89
St 1.0	88.53	9.20
St 1.5	91.96	10.96
St 2.0	84.11	13.71
Po 0.5	60.16	3.41
Po 1.0	68.51	3.60
Po 1.5	72.46	3.80
Po 2.0	73.67	4.54
Gl 0.5	70.92	4.25
Gl 1.0	78.40	4.62
Gl 1.5	75.84	5.23
Gl 2.0	72.79	5.71



**Figure III-15:** (a) Tableau contenant les résistances moyennes à la compression et à la flexion pour tous les mélanges; et (b) module de Young dynamique par rapport à la résistance à la compression.

### III.3.3 Conclusion

Cette recherche visait à étudier l'influence des fibres d'acier, de polypropylène et des microfibrilles de verre sur les propriétés physiques de FRC (Béton renforcé par des fibres). La matrice cimentaire a été maintenue constante pour faciliter la comparaison des différentes propriétés des matériaux, à savoir l'ouvrabilité, densité, porosité et module de Young, ne variant que le type et le dosage des fibres, ce dernier allant de 0,5% à 2%. Un total de trois cent douze échantillons, 24 pour chaque mélange, ont été produits et testés. En conclusion générale, on peut affirmer que l'ouvrabilité des mélanges est fortement réduite par l'ajout des fibres, en particulier pour les mélanges en polypropylène et en fibres de verre, le nombre de fibres dans ces cas est, pour le même dosage, beaucoup plus élevé que la valeur correspondante pour les mélanges avec des fibres d'acier. Les conclusions suivantes sont mises en évidence :

- Les fibres d'acier ont une densité plus élevée que la matrice cimentaire, ainsi la densité du mortier augmente avec l'augmentation de dosage en fibres d'acier. Pour les fibres de polypropylène, la tendance est contraire, la densité du mortier décroît avec l'introduction de fibres, puisque la densité des fibres est inférieure à celle de la matrice cimentaire. Dans le cas des fibres de verre, la densité du mortier présente une faible variation avec l'introduction des fibres de verre, puisque la densité des fibres et celle de la matrice cimentaire sont similaires. La densité apparente des mélanges renforcés sont plus influencés par la porosité que par la densité du renfort. Ceci est clair pour le mélange de fibre de polypropylène avec 0,5% de renfort, dont la réduction de la densité spécifique

n'est que de 0,3%, tandis que le volume diminue d'environ 8% (voir [Figure III-13 c](#)). La porosité accrue a un impact beaucoup plus élevé sur la densité apparente - en particulier pour polypropylène et fibres de verre - que la relation théorique entre la densité apparente et le rapport densité fibre / matrice.

- La porosité des mélanges renforcés est souvent supérieure à celle mesurée sur le mélange de référence. On peut conclure que la modification du type de fibre implique un changement significatif du nombre de fibres dans le mélange. Par conséquent, l'ouvrabilité est fortement affectée et la capacité de compactage des mélanges renforcés est fortement réduite. Par conséquent, de nombreuses poches d'air qui auraient été libérées dans des circonstances normales, rester piégé dans la matrice FRC (Béton renforcé par des fibres), conduisant à la génération de vides d'air à l'état durci et donc à une porosité accrue.
- Les modules de Young dynamiques et statiques pour les mélanges renforcés sont inférieurs par rapport au mélange de référence. La porosité est plus élevée ([figure III-13 d](#)) dans ces mélanges semble avoir un rôle déterminant, favorisant l'énorme influence sur la réduction du module de Young de la matrice de FRC, par rapport aux modules des fibres.
- La résistance à la compression des fibres de polypropylène et d'acier semble fortement liée à la porosité, la résistance à la compression augmente avec la diminution de la porosité. Pour les fibres de verre, la résistance à la compression n'augmente que jusqu'à 1%, au de la de ce dosage elle présente une diminution proportionnelle à la teneur en fibres. Cette singularité se produit très probablement en raison de la perte d'ouvrabilité et de l'augmentation de l'air dans la matrice de béton.

#### **III.4 Une étude faite par Burcu Akcay et Mehmet Ali Tasdemir :**

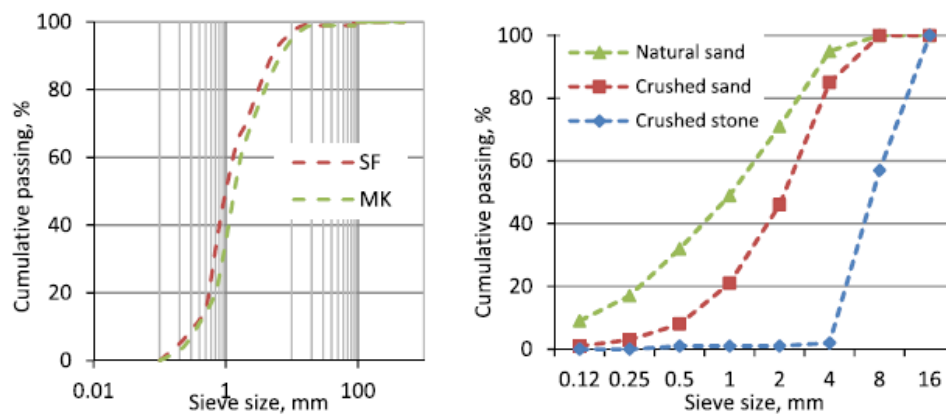
En 2018, une étude faite sur le thème « **Évaluation des performances de la fumée de silice et du métakaolin avec des finesses identiques dans les bétons autoplacants renforcés avec des fibres** » [36].

Les matières premières suivantes ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

1. Ciment portland CEM 42.5R d'une surface spécifique Blaine de 349 m<sup>2</sup>/kg et de poids spécifiques 3,14. Les compositions chimiques des liants sont présentées dans [le tableau III-14](#);
2. La fumée de silice utilisée est une poudre de dioxyde de silicium amorphe qui contient 93,7% de SiO<sub>2</sub> et a une granulométrie moyenne de 0,8 µm et une surface spécifique de 13200 m<sup>2</sup> / kg, de poids spécifiques 2.4;

3. Le métakailin utilisé à une forme calcinée anhydre de kaolinite avec 53% de  $\text{SiO}_2$ , 43,8% d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec une granulométrie moyenne de 1,3  $\mu\text{m}$  et une surface spécifique de 13000  $\text{m}^2/\text{kg}$  et un poids spécifique de 2,5;
4. Les agrégats utilisés contiennent du sable naturel, du sable concassé et du calcaire concassé. Leurs densités spécifiques étaient respectivement de 2,6, 2,61 et 2,72, tandis que les absorptions d'eau efficaces étaient de 2,1%, 1,2% et 1,1% selon ASTM C127-C128 [37,38]. Les courbes de classement des granulats sont illustrées à la Figure III-16;
5. Les fibres d'acier (extrémité crochue) revêtues de laiton avaient une longueur de 30 mm et un diamètre de 0,55 mm, avec un rapport d'aspect (L/d) de 55. La résistance à la traction de la fibre était de 1150 MPa et la fraction volumique était de 1%. Le remplacement partiel des agrégats par la fibre d'acier était basé sur la soustraction d'un volume d'agrégats et son remplacement par le même volume de fibres d'acier;

Les distributions granulométriques de la fumée de silice et métakaolin sont illustrées sur la figure III-16. La fumée de silice a été utilisée à l'état sec et mélangé avec du ciment avant l'addition d'eau. Afin de réguler l'affaissement du béton frais proche de celui du BAP, nous avons utilisé un adjuvant réducteur d'eau haut de gamme à base d'éther poly-carboxylique (HRWRA/high-range water reducing admixture) dans les mélanges. La quantité de mélange a été agencée pour atteindre un diamètre d'affaissement de 60 cm.



**Figure III-16:** Distribution granulométrique des particules de SF, MK et analyse par tamis des agrégats.

**Tableau III-14:** Compositions chimiques (%) du ciment Portland, SF et MK. Les pouzzolanes et leur teneur en oxyde ont été fournis par BASF (**Badische Anilin- & Soda-Fabrik**).

	Portland ciment	SF	MK
<b>CaO</b>	64.66	0.47	0.02
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20.07	93.7	53.0
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.49	0.81	48.8
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.44	1.33	0.43
<b>MgO</b>	1.23	–	0.03
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.76	0.40	–
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.23	1.52	0.19
<b>Perte au feu</b>	2,61	3,28	1,01

#### III.4.1 Les mélanges réalisés

Tout d'abord, les bétons de référence avec deux rapports E/L différents (0,28 et 0,35) ont été fabriqués. Ensuite, le ciment a été remplacé par SF (fumée de silice) ou MK (métakaolin) à des fractions pondérales de 10% (0,28-SF ; 0,28-MK; 0,35-SF et 0,35-MK). Enfin, des fibres d'acier ont été introduites dans les bétons qui ont été confectionné en utilisant des rapports de 0,35 (w/b : E/L) et contenant des pouzzolanes (BAPF-SF et BAPF-MK). La conception du mélange et les codes des bétons sont énumérés dans le [tableau III-15](#).

**Tableau III-15:** Proportions de mélange d'échantillons de béton (1 m<sup>3</sup>).

	REF-0.28	0.28-SF	0.28-MK	REF-0.35	0.35-SF	0.35-MK	BAPF-SF	BAPF-MK
<b>Ciment (kg)</b>	589	531	530	547	490	492	491	490
<b>Eau (kg)</b>	165	162	161	190	190	190	190	190
<b>SF (kg)</b>	0	49	0	0	55	0	55	0
<b>MK (kg)</b>	0	0	47	0	0	55	0	55
<b>Sable naturel (kg)</b>	319	312	312	315	315	316	310	311
<b>Sable concassé (kg)</b>	605	593	592	598	598	599	580	580
<b>Calcaire concassé (kg)</b>	808	790	790	798	800	800	770	770
<b>HRWRA, (kg)</b>	6.61	10.02	8.32	5.86	9.21	7.10	24	22
<b>Fibre d'acier (kg)</b>	0	0	0	0	0	0	78	78

#### III.4.2 Résultats expérimentaux et discussion

##### III.4.3 Retrait autogène volumétrique et évolution de la température des pâtes

Les mesures de poids pour le retrait autogène volumétrique commencent immédiatement après le temps de prise initial; ainsi, les temps de prise initiaux et finaux de toutes les phases de pâte de la série de béton ont été déterminés à l'aide du test à l'aiguille de Vicat. Les résultats sont présentés dans le [tableau III-16](#),

- Aucun changement significatif dans les temps de prise finaux n'est observé pour les pâtes avec les deux rapports E/L (eau/liant), mais il y a une légère diminution de la pâte MK avec un rapport de 0,35 E/L par rapport à la pâte de 0,35-SF. Cependant, on peut voir que le temps de prise initial a été légèrement raccourci dans la pâte MK avec un rapport E/C de 0,28 par rapport à celui de SF. Il convient de noter que les échantillons sont des phases pâteuses de BAP et par conséquent ils contiennent une quantité relativement plus élevée de HRWRA qui peut avoir un effet retardateur sur la prise ;

Le retrait autogène volumétrique et le développement de la température des échantillons de pâte avec différents rapports E/L sont illustrés sur [la figure III-17](#).

- Deux types de pouzzolanes aient un effet croissant sur le retrait autogène des pâtes avec un rapport de 0,35 E/L, dans les heures suivantes, cet effet est observé comme étant plus significatif dans les échantillons avec SF. Le retrait autogène de l'échantillon de référence avec un rapport de 0,35 E/L s'est avéré être de 0,641% à 48 h, alors qu'il était mesuré à 0,832 et 0,696% pour les échantillons avec SF et MK respectivement ;
- D'autre part, dans les pâtes avec des rapports de 0,28 E/L, l'utilisation de MK a entraîné une diminution de retrait autogène par rapport à la pâte de référence aux âges précoces, alors qu'elle commençait à avoir un effet croissant à 10 h. Dans les échantillons de pâte avec MK, le taux d'augmentation du retrait autogène était plus élevé que dans les autres séries, bien qu'ils aient présenté une baisse de retrait autogène à 48 h;

D'autre part, la valeur de retrait autogène était plus élevée dans les échantillons de pâte contenant du SF que celle enregistrée dans l'autre série. Ainsi, les résultats indiquent que MK devrait être un additif minéral plus préférentiellement utilisé que SF pour réduire l'ampleur du retrait autogène;

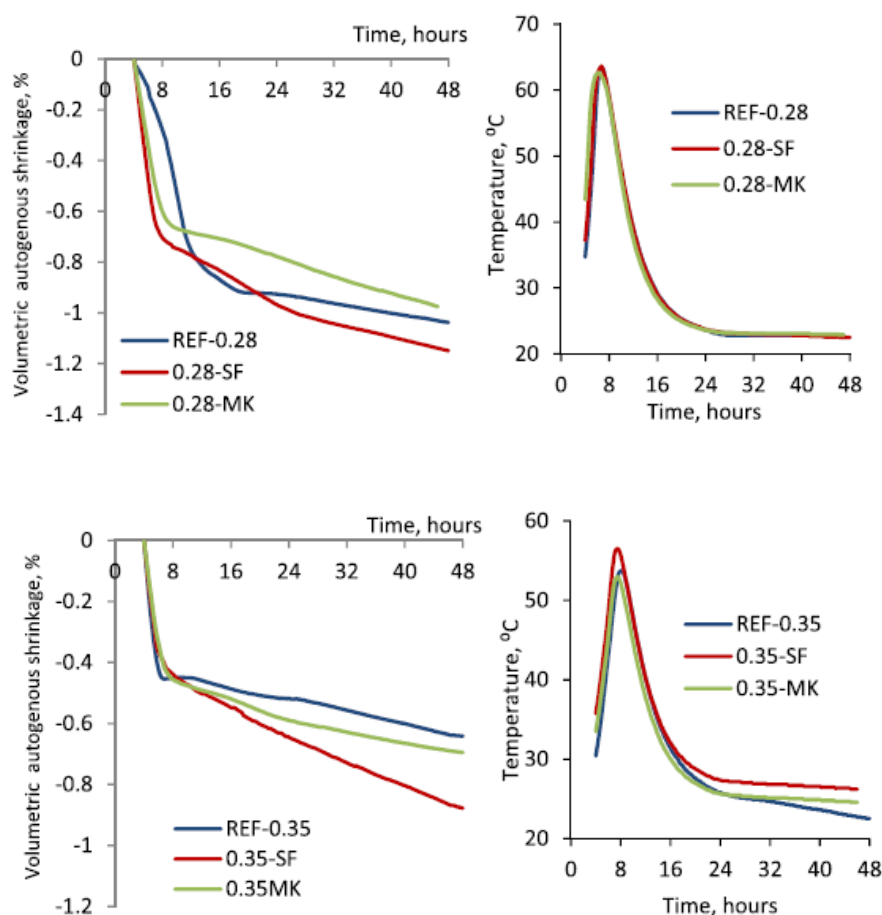
[La figure III-17](#) montre également l'évolution de la température des pâtes à l'état semi-adiabatique.

- Les échantillons de pâte avec SF montrent une température de pic plus élevée que les autres échantillons avec un rapport E/L de 0,35, bien qu'aucune différence significative ne soit observée entre les différentes séries d'échantillons avec un rapport E/L de 0,28 ;
- les échantillons avec un rapport E/L de 0,28, le temps pour atteindre la température maximale était légèrement plus court dans les pâtes avec MK que dans celles de la

pâte de référence ainsi que dans les échantillons contenant du SF. Cela peut être le résultat probable de l'utilisation de MK, qui a un effet promoteur sur l'hydratation du ciment ;

**Tableau III-16:** Temps de prise initiale et finale des pâtes.

	REF-0.28	0.28-SF	0.28-MK	REF-0.35	0.35-SF	0.35-MK
<b>Initial set, minutes</b>	179	188	180	185	197	179
<b>Final set, minutes</b>	228	227	227	224	230	220



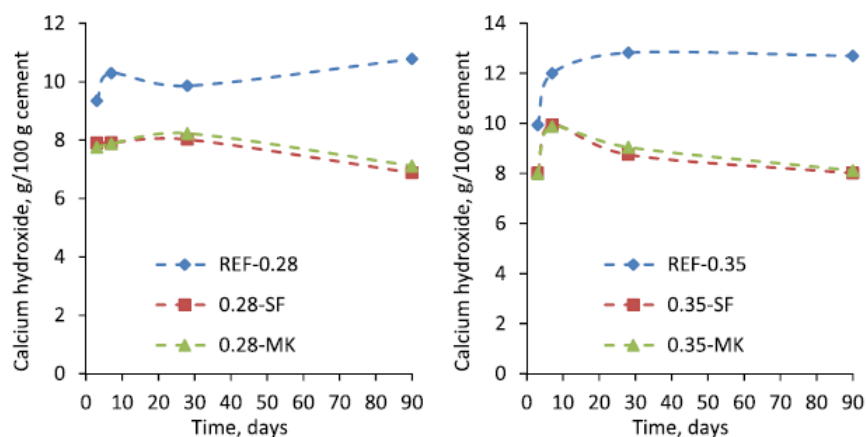
**Figure III-17:** Retrait autogène volumétrique et évolution de la température des pâtes.

- **Teneur en hydroxyde de calcium des pâtes.**

La DTA / TGA a été réalisée pour tous les échantillons 3, 7, 28 et 90 jours après l'élaboration. Au moins deux échantillons de chaque série ont été analysés et les résultats ont été utilisés pour calculer la teneur en hydroxyde de calcium des pâtes.

- Comme le montre la figure III-18, les deux types d'additifs minéraux sont très efficaces pour consommer du l'hydroxyde de calcium dans une pâte durcissant ;

- Dans les bétons de référence avec des rapports de 0,35 E/L, la teneur en hydroxyde de calcium augmente continuellement, tandis qu'en ajoutant du SF ou du MK, elle a d'abord été augmentée au cours des 7 premiers jours puis diminuée progressivement, très probablement à cause de réactions pouzzolaniques ;
- Une augmentation similaire de l'hydroxyde de calcium pour les échantillons contenant des pouzzolanes (SF ou MK) est également observée dans la série avec un rapport E/L de 0,28, mais dans ce cas elle se poursuit jusqu'à 28 jours après l'élaboration (Figure III-18). Cette augmentation progressive est probablement le résultat de la diminution de la teneur en hydroxyde de calcium de la pâte de référence (avec un rapport E/L de 0,28) à 28 jours ;
- Cependant, à partir des résultats présentés, on peut déduire que pour les rapports E/L testés, MK fonctionne légèrement mieux pour consommer la teneur en hydroxyde de calcium à 28 et 90 jours en particulier ;



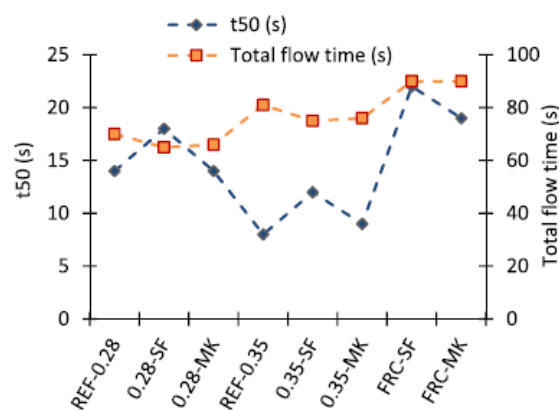
**Figure III-18:** Variations de la teneur en hydroxyde de calcium des pâtes.

#### • Propriétés du béton frais

Les résultats des essais de table d'écoulement traditionnels sont donnés et comparés à la figure III-19.

- Toutes les séries de béton donnent un rayon d'écoulement similaire de 60 cm ( $\pm 1$  cm), le t50 ainsi que les temps d'écoulement totaux varient selon le type d'ajout minéral (SF ou MK) ;
- Dans les échantillons avec des rapports de 0,28 E/L, l'utilisation de l'un des types de pouzzolane a légèrement raccourci le temps d'écoulement total, tandis que le temps t50 a été légèrement augmenté en utilisant SF, mais n'a pas été beaucoup affecté par l'ajout de MK ;

- Des effets similaires peuvent également être observés dans les échantillons avec des rapports de 0,35 E/L ;
- Il convient également de noter que des quantités variables de superplastifiant (HRWRA) ont été utilisées pour produire des bétons autoplaçants (CCS). Comme le montre le [tableau III-15](#), la quantité de superplastifiant (HRWRA) requise pour atteindre la fluidité souhaitée est plus élevée dans les bétons avec fumée de silice (SF) que dans ceux avec du métakaolin (MK). Lenka et Panda[39], ont étudié l'effet de la quantité de métakaolin (MK) sur la maniabilité du BAP dans un rapport E/L constant et a déclaré que la maniabilité du BAP est améliorée avec l'augmentation de la quantité de métakaolin (MK) ;
- Comme prévu, le t50 et les temps d'écoulement totaux ont tous deux augmenté avec l'introduction de fibres dans les BAP ;
- Dans le cas du BAPF avec fumée de silice (SF), l'utilisation de fibres a provoqué une augmentation à la fois du temps t50 et du temps d'écoulement total, alors que cet effet était moins significatif dans le BAPF avec métakaolin (MK) ;
- Bien que les deux matériaux aient des finesses presque identiques, on peut dire que métakaolin (MK) offre une meilleure performance de fluidité que la fumée de silice (SF) dans le béton normal et le BAPF.



**Figure III-19:** temps d'écoulement total et t50 des BAP.

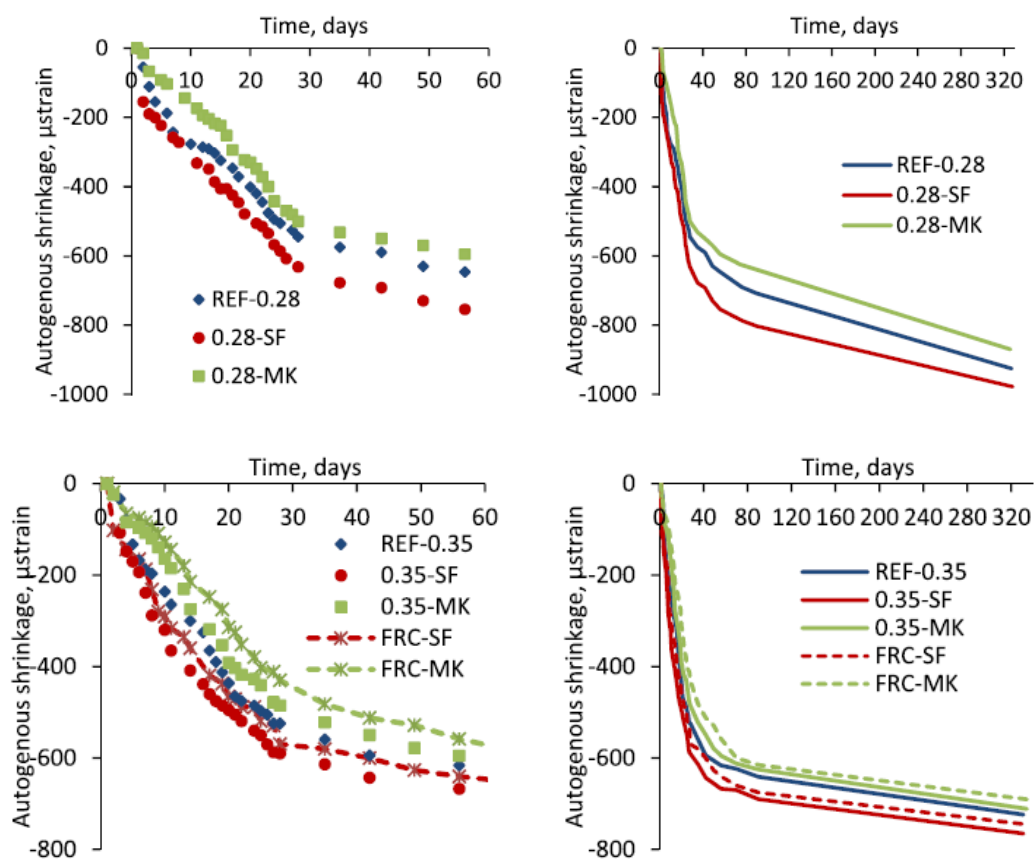
- **Rétrécissement autogène linéaire du béton autoplaçants (SCC)**

Les résultats des mesures de retrait autogène sont illustrés sur la [Figure III-20](#). On remarque que :

- L'addition de la fumée de silice (SF) a augmenté l'amplitude du retrait autogène dans les BAP préparés en utilisant les deux rapports E/L par rapport à leurs mélanges témoins correspondants ;

- L'utilisation de métakaolin (MK), n'a pas eu d'effet significatif sur le retrait autogène du béton avec des rapports de 0,35 E/L, mais a entraîné une diminution substantielle du béton avec des rapports de 0,28 E/L ;
- Alors que la valeur de retrait autogène enregistrée dans le béton de référence (REF-0,28) était de 545  $\mu$  de déformation à 28 jours, avec l'ajout de SF et de MK, les bétons atteignaient respectivement 632 et 500  $\mu$  de déformation ;
- Dans les deux rapports E/L, le taux d'augmentation du retrait autogène est plus faible dans les bétons avec MK par rapport à ceux avec SF et les échantillons de référence ;
- La différence observée semble être le résultat probable de la réactivité pouzzolanique supplémentaire du SF, qui provoque une augmentation supplémentaire du retrait autogène comme également indiqué ci-dessus.

Les variations du retrait autogène du BAPF sont également présentées à titre de comparaison (Figure III-20).



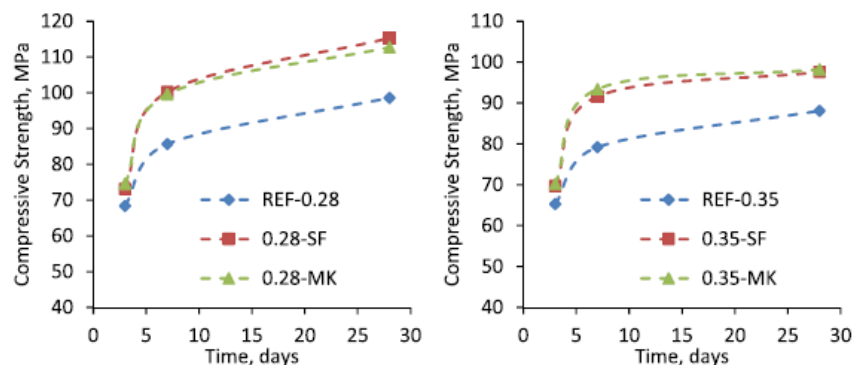
**Figure III-20:** Variations du retrait autogène des mélanges de BAP.

- **Propriétés mécaniques et de la rupture des BAP**

- ✓ **Développement de la résistance à la compression**

L'évolution de la résistance à la compression des bétons est présentée sur la figure III-21, où les effets positifs de SF et MK sur la résistance à la compression peuvent être observés.

- Les résultats montrent qu'à un taux de remplacement de 10%, l'utilisation des deux types d'additifs a augmenté la résistance à la compression des bétons à un taux similaire à tous les âges testés ;
- Il semble y avoir seulement une petite différence dans les bétons avec des rapports de 0,28 E/L à 28 jours car la résistance à la compression du béton était de 98,6 MPa, tandis que les valeurs enregistrées dans les BAP avec SF et MK étaient de 115,3 et 112,7 MPa, respectivement ;
- Aux âges précoces, cependant, l'amélioration de la résistance à la compression semble être plus évidente dans les bétons avec MK et cet effet est légèrement plus élevé dans les échantillons avec des rapports de 0,35 E/L ;
- La formation de phases d'alumine telles que  $C_2ASH_8$  à des âges précoces a entraîné une résistance plus élevée dans le mortier contenant du MK que celle avec le SF. Les résultats des développements de la résistance à la compression soulignent que le MK peut être utilisé comme matériau alternatif au SF dans le BAP à haute résistance.



**Figure III-21:** Développement de la résistance à la compression des mélanges de BAP.

- ✓ **Propriétés mécaniques et de fracture**

- Une augmentation significative est observée dans la résistance à la compression des bétons en ajoutant soit SF ou MK comme discuté précédemment ;
- En utilisant MK ou SF, les modules d'élasticité des bétons ont également augmenté à un taux similaire par rapport aux échantillons de référence correspondants ;

- Comme le montre le [tableau III-17](#), l'utilisation de l'une ou l'autre de ces pouzzolanes a également entraîné une légère diminution de la résistance à la rupture du béton.

**Tableau III-17:** Propriétés mécaniques et paramètres de fracture des BAP à 28 jours.

	<b>f<sub>c</sub>, MPa</b>	<b>E, GPa</b>	<b>GF, N/m</b>	<b>f<sub>flex</sub>, MPa</b>	<b>f<sub>st</sub>, MPa</b>
<b>REF-0.28</b>	98.6	40.8	73.9	7.4	7.1
<b>0.28-SF</b>	115.3	45.2	62.5	8.2	7.0
<b>0.28-MK</b>	112.7	44.9	65.4	8.1	7.0
<b>REF-0.35</b>	88.1	36.4	83.6	6.1	7.0
<b>0.35- SF</b>	97.6	40.2	67.9	6.6	6.9
<b>0.35-MK</b>	98.2	40.1	72.7	6.5	6.8
<b>FRC-SF</b>	118.6	45.6	12,169	11.3	11.8
<b>FRC-MK</b>	119.1	45.5	14,666	12.4	11.7

Avec :

f<sub>c</sub>: résistance à la compression; E: module d'élasticité; GF: énergie de fracture.

f<sub>flex</sub>: résistance à la flexion ; f<sub>st</sub>: résistance à la traction par fendage.

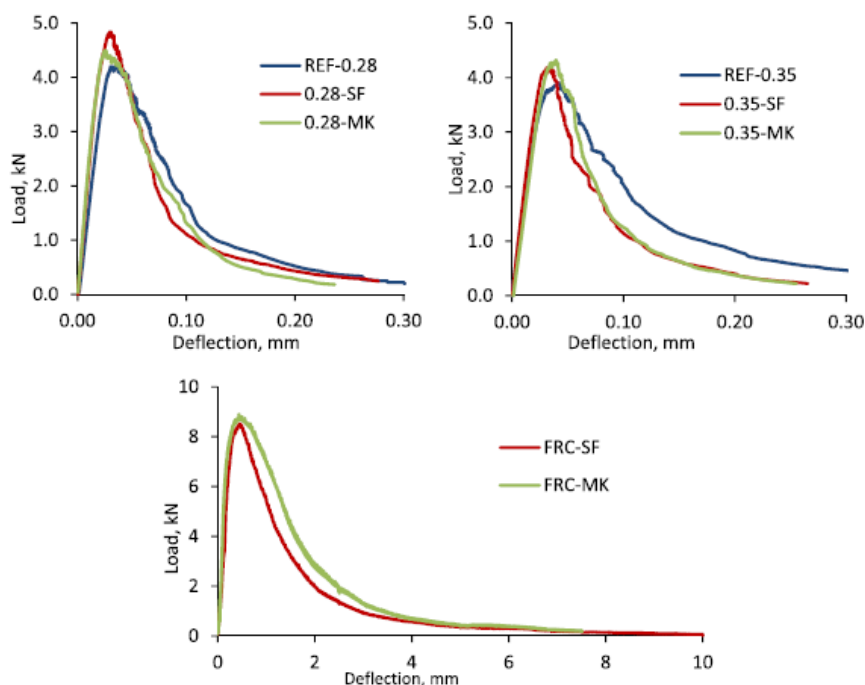
- Les résultats expérimentaux indiquent que l'effet le plus remarquable de l'addition de pouzzolane est observé sur l'énergie de fracture du BAP. Comme le montre le [tableau III-17](#), les énergies de fracture des BAP ont été diminuées en utilisant MK et SF, bien que cet effet soit plus prononcé pour le cas de l'addition de SF. Ceci est particulièrement évident dans les échantillons avec un rapport E/L de 0,28 ;
- Les résultats présentés ici montrent que les ajouts de SF et de MK améliorent à la fois la microstructure des composites et améliorent considérablement les résistances mécaniques des BAP ([tableau III-17](#)).

#### ✓ **Performance mécanique du BAPF**

Dans le cadre de cette étude, les BAPF ont également été produits pour tenter de clarifier s'il existe une différence de performance de BAPF avec les MK ou SF.

- Les résultats montrent que les BAPF avec MK et SF ont des valeurs de résistance à la compression similaires, tandis que leurs performances en flexion diffèrent considérablement ;
- BAPF avec MK a également une énergie de fracture considérablement plus élevée;
- Comme le montre [la figure III-22](#), la courbe descendante après la pointe est beaucoup plus raide en BAPF avec SF, ce qui indique une énergie de fracture plus faible ;

- Puisque les fibres utilisées dans nos expériences sont les mêmes pour les bétons avec différents types d'additifs, les facteurs clés qui affectent les performances du BAPF sont les propriétés de la matrice, ainsi que la force de liaison entre la matrice et les fibres ;
- Duan et al. [40] a étudié l'ITZ dans le béton et a montré que l'ajout de MK entraînait un meilleur raffinement des pores et une amélioration de l'ITZ (la zone de transition interfaciale) que l'ajout de SF ;
- Chan et Chu. [41], ont également effectué des essais sur le béton autoplaçants fibrés, ont montré que l'introduction de SF dans le béton améliore la liaison de la matrice-fibres ;
- Nos résultats ont également montré que le raffinement des pores par l'ajout de SF ou de MK a entraîné de meilleures performances de liaison des fibres avec la matrice, bien que cet effet soit plus significatif dans les mélangé BAPF avec MK ;
- Comme la montre le tableau III-15, le BAPF avec MK nécessitait relativement moins de superplastifiant (HRWRA) que le BAPF avec SF, et comme HRWRA a entraîné un peu d'air dans la matrice, il peut provoquer une zone de transition interfaciale (ITZ) légèrement plus poreuse entre les fibres et la matrice dans le BAPF-SF ;



**Figure III-22:** Courbes de déformation de charge représentatives pour les mélanges BAP.

### III.4.4 Conclusions

Sur la base de l'étude comparative sur les propriétés du BAPF avec SF et MK par rapport à un BAP, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Dans les pâtes avec des rapports de 0,28 et 0,35 E/L, le temps de prise initial a été légèrement raccourci en utilisant MK, alors qu'il a été retardé en cas d'utilisation de SF comme additif minéral. L'évolution de la température des pâtes en condition semi-adiabatique a montré que MK a un effet promoteur sur l'hydratation du ciment;
- Les mesures de retrait autogène volumétrique au jeune âge ont montré que les deux types de pouzzolanes avaient un effet croissant sur le retrait autogène de la pâte avec des rapports de 0,35 E/L, bien que cet effet soit plus significatif dans les bétons avec SF. D'autre part, dans les bétons avec des rapports de 0,28 E/L, l'addition de MK a entraîné un retrait autogène plus faible à 48 h;
- Dans les deux séries de rapport E/L, MK s'est avéré plus efficace que SF pour réduire le retrait autogène du BAP, et ce résultat s'est avéré valide pendant près d'un an après l'élaboration;
- Les deux additifs minéraux se sont révélés efficaces pour consommer du CH, bien que les résultats du DTA / TGA aient montré que l'addition de MK entraînait un taux de consommation d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca OH}_2$ ) légèrement plus élevé;
- Les résultats du développement de la résistance à la compression ont montré qu'à 10% de remplacement de pouzzolane, l'ajout des deux types d'additifs conduit à une augmentation globale de la résistance à la compression des bétons à tous les âges, bien que MK joue un rôle plus efficace à un âge précoce. Des résistances mécaniques à la compression rapprochées et des modules d'élasticité presque identiques ont été obtenus avec les additions SF et MK ;
- Les résultats des tests ont montré que l'effet le plus significatif de l'addition de pouzzolane est sur l'énergie de fracture du BAP. Il a été démontré que les deux types de pouzzolanes réduisent les énergies de fracture des bétons. bien que l'effet de SF soit plus prononcé ;
- L'utilisation de fibre d'acier dans le béton autoplaçant avec des rapports de 0,35 E/L a considérablement augmenté les énergies de fracture. Il a été démontré que le BAPF mélangé avec MK avait une énergie de fracture remarquablement plus élevée que le BAPF mélangé avec SF, indiquant que MK offre probablement de meilleures propriétés de liaison entre la matrice et les fibres d'acier ;

- Dans l'ensemble, les résultats indiquent que MK est un additif minéral plus efficace que le SF à utiliser dans les BAP et BAPF haute performance pour les matériaux utilisés dans cette étude et les rapports E/L sélectionnés.

### **III.5 Une étude faite par Sherif Yehia, Ala Eddin Douba, Omar Abdullahi, Sharef Farrag :**

En 2016, une étude faite sur le thème « **Évaluation mécanique et durabilité de béton autoplaçant renforcé des fibres** » [42].

Les matières premières suivantes ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

1. Des agrégats grossiers (calcaire concassé) d'une taille maximale de 10 mm ont été utilisés pour tous les mélanges ;
2. Agrégat fin : sable concassé (1/4,75 mm) et du sable de dune (<0,3 mm) ;
3. BASF GleniumSky 504 (superplastifiant) ;
4. Fumée de silice ;
5. Fibres d'acier avaient un rapport (l/d) de 67 et une longueur de 50 mm (module d'élasticité = 210 GPa, résistance à la traction = 1 000 MPa);
6. Les fibres synthétiques (module d'élasticité 9,5 GPa, résistance à la traction = 620 MPa) avaient un rapport (l/d) de 90 et une longueur de 40 mm.

Les produits utilisés sont des matériaux locaux aux Emirats Arabes Unis, afin de garantir la qualité des mélanges, Les résultats de ces essais sont indiqués dans le [tableau III-18](#).

#### **III.5.1 Les mélanges réalisés**

Dans cet article, ils ont étudié l'effet de l'addition de fibres synthétiques, d'acier et hybrides sur les propriétés mécaniques et les aspects de durabilité du BAP sous exposition à des cycles mouillage / séchage, commençant au septième jour après la coulée ont été évalués. Les essais ont été menés en deux phases :

La phase I : les échantillons ont été conservés dans des conditions de laboratoire et testés pour déterminer les résistances à la traction, à la compression, à la flexion et à la fissuration et le module d'élasticité.

La phase II: les propriétés mécaniques ont été évaluées après avoir soumis les échantillons à des cycles mouillage / séchage pendant 21 jours.

[Le tableau III-19](#) présente les mélanges de béton autoplaçant (SCC), béton autoplaçant renforcé par des fibres synthétique (SyFRSCC), béton autoplaçant renforcé par des fibres d'acier (SFRSCC) et de béton autoplaçant renforcé par des fibres hybride (HyFRSCC), qui ont été utilisés dans les deux phases du programme expérimental.

**Tableau III-18:** Propriétés des agrégats utilisés.

	Physique								Mécanique	
	Indice de floconnage (%)	Indice Élongation (%)	Masse volumique (kg / m <sup>3</sup> )		Absorption (%)	Masse volumique sèche	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente	VBA	LAA
			Ample	Compacté						
Agrégat grossier	15	8.7	1412	1513	1.1	2.62	2.65	2.7	20	18
Agrégat fin (Sable concassé)	-	-	1394	1729	2.3	2.51	2.57	2.66	-	-
Agrégat fin (Sable des dunes)	-	-	1295	1620	1.0	2.56	2.58	2.63	-	-
Limite	<25	<15	-	-	-	-	-	-	<23	-
Standard utilisé	BS 933-3:2012	BS 812:105.2	ASTM C29/C29 M		ASTM C127			BS EN 1097-2:2010		

**VBA :** Valeur de broyage agréée. **LAA :** résultat d'abrasion de l'essai Los Angeles.

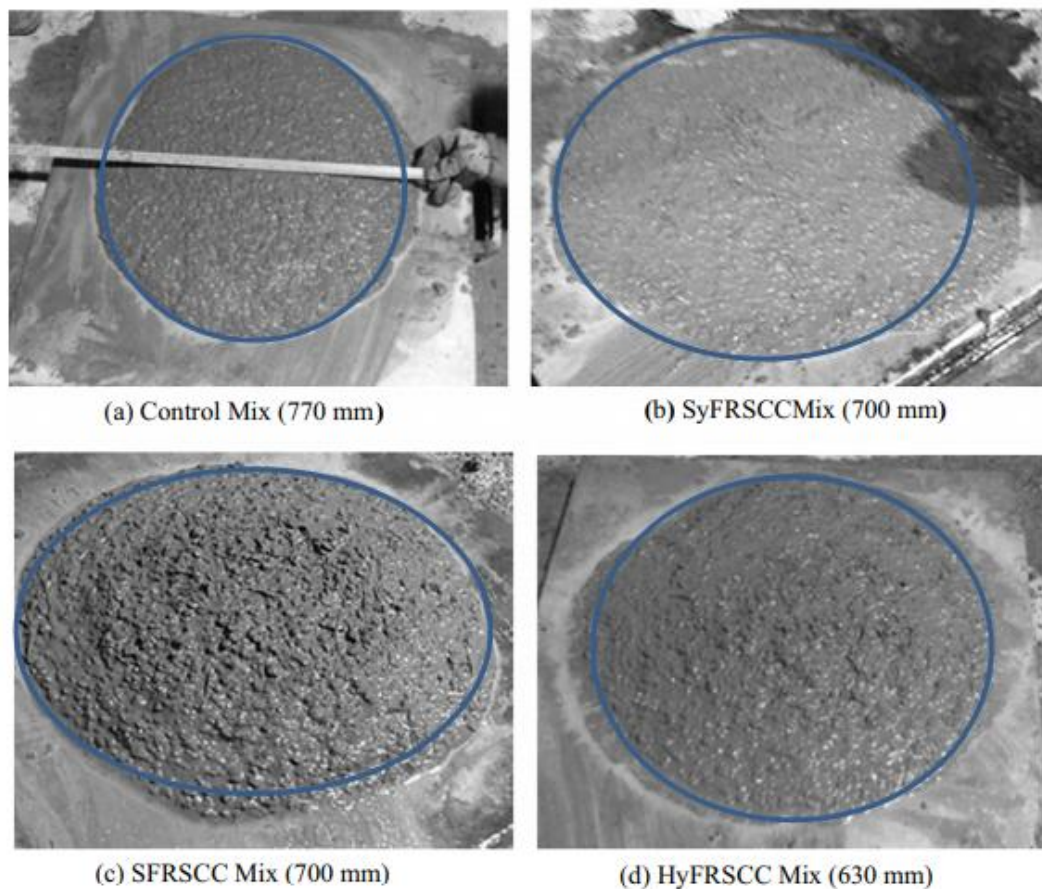
**Tableau III-19:** Constituants des bétons (SCC, SyFRSCC, SFRSCC, et HyFRSCC)

Constituant	Masse volumique	Les mélanges				
		Plage de fraction volumique typique	BAP	SBAPF	SyBAPF	HyBAPF
Ciment	3.15	0.1-0.2	409.5	409.5	409.5	409.5
Fumée de silice	2.20	0-0.08	110.0	110.0	110.0	110.0
Eau	1.00	0.05-0.2	185.0	185.0	185.0	185.0
NW CA	2.56	0.2-0.5	793.6	793.6	793.6	793.6
Sable grossier	2.58	0.2-0.6	374.1	361.2	361.2	361.2
Sable de dune	2.58		464.4	464.4	464.4	464.4
Fibre synthétique	0.92	0.025-0.05	-	-	4.6	2.3
Fibre d'acier	7.77		-	38.8	-	19.4
Superplastifiant	1.11	0-0.01	7.0	7.0	7.0	7.0

### III.5.2 Résultats et discussions

#### III.5.2.1 Propriétés du béton frais

Le tableau III-20 résume les résultats d'évaluation de béton frais. L'écoulement pour chaque mélange a été mesuré immédiatement après le mélange de béton. Figure III-23 illustre l'étalement atteint pour les différents mélanges ; tous les mélanges ont atteint un niveau satisfaisant de fluidité. De plus, tous les mélanges remplissaient généralement les critères concernant la capacité de remplissage et les exigences de résistance à la ségrégation. Cependant, SyFRSCC et HyFRSCC ont particulièrement montré une capacité de passage inférieure comme indiqué à partir du test J-ring.



**Figure III-23:** Écoulement obtenu par différents mélanges FRSCC.

**Tableau III-20:** Résultats de l'évaluation de béton à l'état frais.

Mélange	Slump flow		J-ring		Stabilité au tamis Dépassement (%)	orimet T <sub>0</sub> (0)
	Propagé(mm)	T50(sec)	Bj(cm)	T50j(s)		
Contrôlé	770	4.2	0.9	5.7	22.0	1.3
SyFRSCC	700	8.0	6.0	38.1	15.3	2.5
SFRSCC	70	14.5	1.4	21.5	13.3	1.9
HyFRSCC	630	7.9	2.6	26.0	12.7	2.9

Divers effets ont été observés lors de l'ajout de fibres sur les propriétés à l'état frais du BAP dans l'étude actuelle.

- Quel que soit le type de fibre, tous les mélanges avaient un affaissement compris entre 600 et 770 mm en 4 à 15 s.
- L'ajout de fibres synthétiques a considérablement réduit la capacité de passage du BAP en augmentant  $B_j$  de 0,9 cm à 6 cm et 2,6 cm dans SyFRSCC et HyFRSCC, respectivement, tandis que le SFRSCC a atteint un  $B_j$  de 1,4 cm.  $B_j$  est défini comme marche de blocage (différence de hauteur entre le centre du béton et le bord du béton) et généralement une différence de hauteur maximale de 1,5 cm est considérée pour le BAP.

Lorsque J-RING était utilisé tel quel indiqué dans [le tableau III-20](#).

- La capacité de remplissage du BAP n'a pas été affectée par l'addition des fibres comparant les résultats de l'essai orimet obtenus à partir du mélange différent, pour lesquels les durées de baisse  $> 5$  s sont considéré comme significatives.
- Tout aussi important, l'ajout de fibres a augmenté la résistance à la ségrégation du béton (pourcentage de mortier réduit passant de 22% à 12% –16%), ce qui est évident grâce à la stabilité du tamis testé. Ces résultats sont influencés par le type et le pourcentage de fibre.

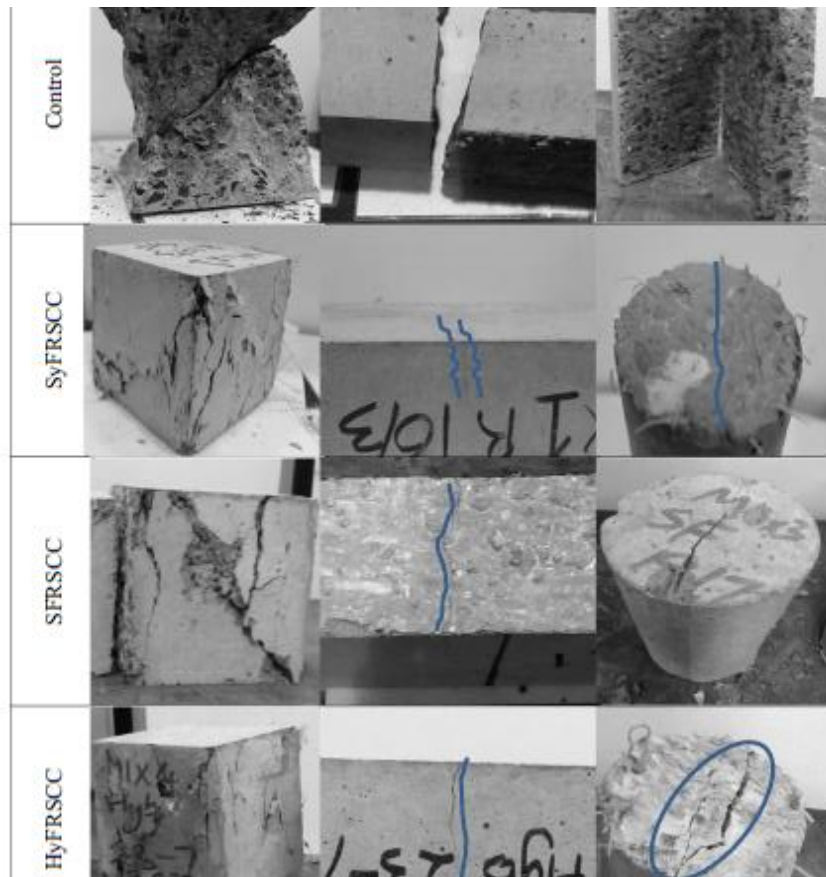
### III.5.2.2 Propriétés du béton durci

Les résultats de l'évaluation des propriétés mécaniques sont résumés dans [le tableau III-21](#).

#### • Résistance à la compression

Pour les essais dans lesquels la différence entre les résultats de deux échantillons était  $> 5$  MPa, l'échantillon a été rejeté.

- Pour tous les mélanges de la phase I, les résistances à la compression du cube étaient de  $70 \pm 5$  MPa avec le mélange SyFRSCC offrant une résistance supérieure à celle du mélange témoin à 28 jours ;
- Alors que pour la phase II, les résistances à la compression du cube des mélanges étaient de  $80 \pm 5$  MPa, indiquant une augmentation de la résistance globale des échantillons exposés aux cycles mouillage / séchage par rapport à l'échantillon non exposé, [la figure III-24](#) représente des échantillons représentatifs de chaque mélange après la rupture ;
- Les échantillons de mélange contrôlés ont écrasé de manière explosive tandis que les mélanges de FRSCC ont écrasés avec une performance post-fissuration améliorée ;



**Figure III-24:** Modes de rupture des mélanges de béton sous différentes charges.

- **Résistance à la flexion**

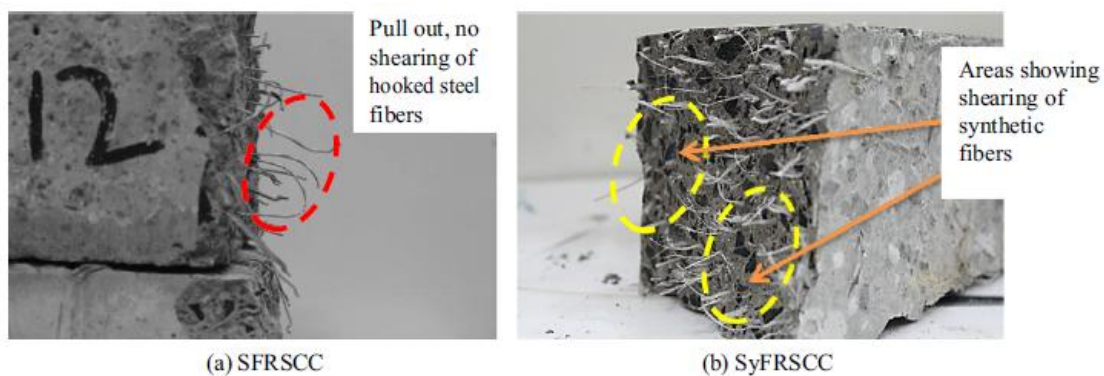
- La présence des fibres augmente la résistance à la flexion. Cependant, étant donné que le type de fibre a un mécanisme différent de retenue des fissures et de résistance aux contraintes de traction internes, chaque mélange de FRSCC a tendance à se comporter différemment dans les essais de flexion, comme le montre le [tableau III-21](#) ;
- Parmi tous les tests, les mélanges FRSCC ont obtenu de meilleurs résultats que le mélange témoin dans les deux phases ;
- L'ajout de fibres a conduit à une résistance à la flexion BAP accrue dans les deux phases dans la plage de 7% à 55% ;
- Le mélange SyFRSCC a obtenu une performance de flexion similaire dans les deux phases, avec une augmentation de 26% et 45% par rapport aux échantillons témoins dans les phases I et II respectivement. Alors que tous les échantillons testés donnent des résultats satisfaisants en flexion, les échantillons de mélange contrôlés ont été divisés en deux avec une défaillance soudaine, comme le montre [la figure III-24](#) ;

- Cependant, en raison de la capacité des fibres à combler les fissures, à résister aux forces de traction et à améliorer la ductilité du béton, tous les échantillons de FRSCC(BAPF) ont montré un comportement post-fissuration amélioré, comme le montre la figure III-24 ;

Figure III-25 a et b montrent la distribution des fibres des échantillons testés SFRSCC et SyFRSCC respectivement. On constate que les fibres sont bien réparties sur la profondeur du prisme, ce qui confirme qu'une répartition homogène des fibres a été obtenue.

**Tableau III-21:** Résultats de l'évaluation des propriétés mécaniques.

Mélanges		Compression (cube/MPa)				Compression (cylindre/MPa)			Flexion (MPa)				Traction	E
		Age (j)												
		3	7	21	28	3	7	28	3	7	21	28	28	28
Phase 1	Éch 1	42.8	54.6	74.4	70.4	<del>24.6</del>	<del>-7.7</del>	58.3	4.30	4.55	5.10	6.25	3.45	24.5
	Éch 2	46.8	55.1	75.5	73.7	34.6	53.2	60.5	4.55	5.05	5.70	6.60	4.08	28.6
	<b>contrôlé</b>	44.8	54.9	74.8	72.1	34.6	53.2	59.4	4.43	4.80	5.40	6.43	3.77	26.6
	Éch 1	35.5	46.0	63.1	69.2	29.2	26.4	59.2	5.30	5.10	6.23	8.20	4.06	26.2
	Éch 2	35.8	48.9	64.4	81.2	29.4	38.1	62.6	5.60	5.40	6.58	8.28	4.14	27.5
	<b>SyFRSCC</b>	36.2	47.5	63.8	75.1	29.3	32.3	61.3	4.45	5.25	6.41	8.24	4.10	26.8
	Éch 1	42.9	55.4	67.7	70.6	34.9	<del>29.4</del>	63.8	5.35	6.50	6.95	6.90	4.47	26.6
	Éch 2	43.3	57.3	71.7	72.1	36.0	56.0	66.2	6.40	7.30	8.05	7.10	5.08	29.9
	<b>SFRSCC</b>	43.1	56.4	69.7	71.4	35.5	56.0	65.0	5.88	6.90	7.50	7.00	4.78	28.3
	Éch 1	37.7	56.1	70.5	69.2	39.7	56.2	63.6	6.55	6.10	7.40	<del>5.50</del>	6.35	25.8
	Éch 2	45.1	58.6	72.2	69.6	45.0	57.2	64.9	7.75	6.25	7.90	7.90	7.13	29.2
	<b>HyFRSCC</b>	44.4	57.4	71.4	69.4	42.4	56.7	64.3	7.15	6.18	7.65	7.90	6.74	27.7
Phase 2	Éch 1				80.6							6.00	4.40	28.7
	Éch 2				81.1							<del>3.10</del>		29.7
	<b>contrôlé</b>				80.9							6.0	4.40	29.2
	Éch 1				73.8							7.80	3.70	31.0
	Éch 2				80.6							9.60	4.45	<del>44.8</del>
	<b>SyFRSCC</b>				77.2							8.70	4.5	31.0
	Éch 1				72.0							6.25	3.60	33.2
	Éch 2				89.7							9.15	6.00	<del>37.4</del>
	<b>SFRSCC</b>				80.9							8.05	4.8	33.2
	Éch 1				79.2							9.2	6.18	31.1
	Éch 2				80.8							9.45	6.77	27.2
	<b>HyFRSCC</b>				79.7							9.33	6.48	29.2



**Figure III-25:** Répartition des fibres dans les mélanges FRSCC.

- **Résistance à la traction**

Bien que la résistance à la flexion soit un indicateur de la résistance à la traction, la résistance à la traction par fendage peut également confirmer ces résultats puisqu'elle mesure indirectement la résistance à la traction. Les résultats présentés dans le [tableau III- 21](#) indiquent clairement

- Une augmentation de la résistance à la traction par fendage après l'addition de fibres pour tous les mélanges de fibres par rapport au mélange témoin dans les deux phases ;
- De plus, le mélange témoin de la phase II a montré une augmentation notable (0,5 MPa) de la résistance à la traction en raison d'une meilleure hydratation ;
- Le mélange SyFRSCC a présenté l'augmentation la plus faible de la résistance à la traction alors qu'il a fourni la plus forte augmentation de la résistance à la flexion ;
- La fissure capillaire est représentée sur [la figure III-24](#) comme indication de la rupture des échantillons de SFSCC dans cet essai ;

- **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité est lié à la rigidité du béton. Cependant, le diagramme contrainte-déformation peut être utilisé pour indiquer le comportement ductile du béton. Les résultats du module d'élasticité atteint dans les phases I et II sont présentés dans [le tableau III-21](#).

- Presque tous les échantillons contenant des fibres ont obtenu une légère augmentation des modules de l'ordre de 6 à 13% par rapport au mélange témoin.
- les fibres d'acier ont conduit à une augmentation plus élevée du module d'élasticité en examinant l'augmentation globale du SFRSCC en phase I et du HyFRSCC en phase II.

### III.5.2.3 Durabilité

- **Test de pénétration rapide des chlorures (RCPT)**

Le RCPT fournit des informations sur la résistance du béton à la pénétration des ions chlorure, une indication de la densité du béton et de la perméabilité du béton. Les résultats, rapportés dans Coulombs, ne doivent pas être interprétés quantitativement, mais plutôt qualitativement.

- Tous les mélanges avaient un potentiel de pénétration de chlorure très faible déterminé selon ASTM C1202 comme indiqué dans [le tableau III-22](#), ce qui indique que tous les mélanges ont une faible perméabilité et sont denses. et une très faible probabilité de détérioration due à la pénétration de chlorure.

**Tableau III-22:** Résultats RCPT trouvés dans la littérature en comparaison avec l'étude actuelle

Référence	Mélange	w/b	Charges passées (Coulombs)
De [60]	BAP	0.28	340(très bas) *
De [61]	BAP	0.35	820(très bas)
De [4]	BAP	0.35	525(très bas)
Etude actuelle	BAP	0.35	196(très bas)
	SFRSCC		251(très bas)
	SyFRSCC		131(très bas)
	HyFRSCC		598(très bas)

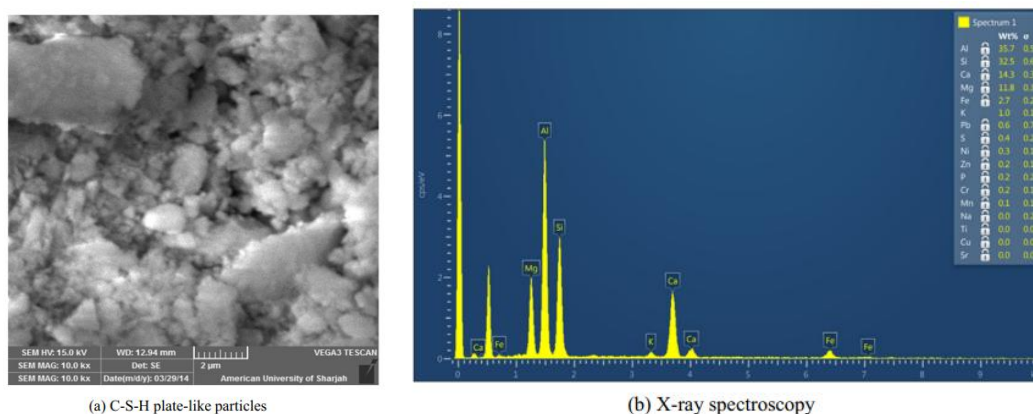
\* Classe de perméabilité selon ASTM C1202.

### • Microscopie électronique à balayage (SEM)

Le but des images SEM était d'étudier l'interaction entre les fibres et le mortier environnant au niveau microstructural pour tenter d'expliquer le comportement à l'échelle macro. Aucun échantillon n'a été extrait de HyFRSCC en raison de la difficulté d'obtenir un échantillon contenant les deux fibres.

#### ➤ Pâte de ciment

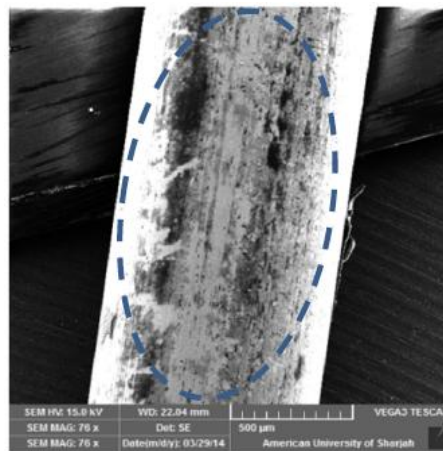
La figure III-26 (a) montre la morphologie de la pâte cimentaire. Les particules se manifestaient principalement sous la forme de formations irrégulières mal cristallines, indiquant l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H), le principal résultat de l'hydratation du ciment. Les particules ont varié en taille, la plus grande dimension variante entre 0,5 et 4,53  $\mu\text{m}$ . En outre, Les résultats de la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie affichés sur la figure III-26 (b) ont montré des concentrations élevées d'Al (35,7%), Si (32,5%) et Ca (14,3%), confirmant que les formations sont des particules C-S-H.



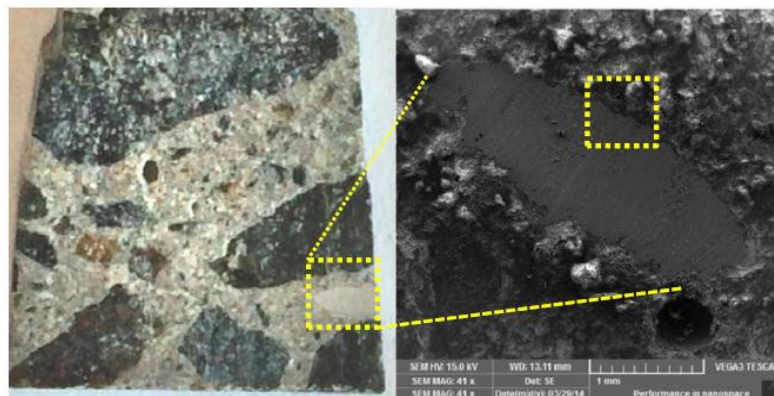
**Figure III-26:** La morphologie de la pâte cimentaire et formation des CSH.

- **Interaction de pâte cimentaire et de fibre d'acier**

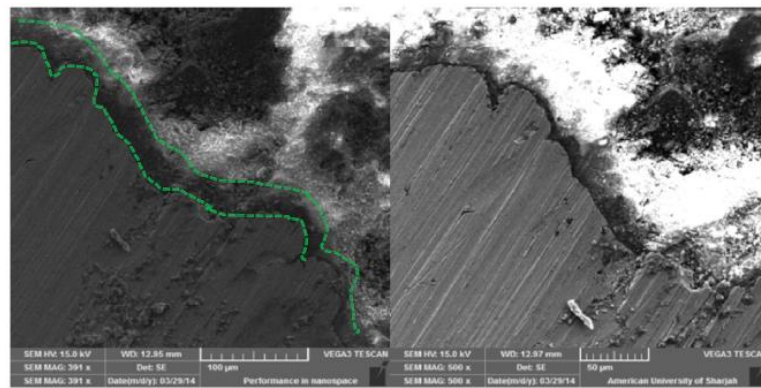
L'interaction entre les fibres d'acier et le mortier était au centre des échantillons du SFRSCC. La figure III-27 (a) représente une fibre d'acier agrandie. Il montre la rugosité de surface innée des fibres d'acier due au processus de fabrication, ce qui entraîne des lignes de grains longitudinales parallèles. La figure III-27 (b) illustre une image agrandie 40x d'une fibre d'acier entourée de mortier à partir de l'emplacement indiqué. Aucun espace n'a été observé entre la fibre et la pâte environnante. De plus, il n'y avait aucune fissure visible à ce niveau de grossissement. Tout aussi important, une couche noire distincte entourant tout le périmètre de la fibre d'acier (effet de paroi) a été observée. Cependant, son épaisseur pourrait pas être estimée à ce niveau de grossissement. Les figures III-27 (c) et (d) présentent respectivement 390x et 500x images agrandies qui ont aidé à identifier cette couche. L'épaisseur de la couche a été estimée à partir de cette dernière qui était d'environ 8,5  $\mu\text{m}$ . L'image a été encore agrandie jusqu'à 1120 et des micro-fissures étaient clairement visibles comme le montre la figure III-27 (e). La largeur moyenne estimée des fissures était de 0,5  $\mu\text{m}$ . L'image a été encore agrandie jusqu'à 1120x et des micro-fissures étaient clairement visibles comme le montre la figure III-27 (e). La largeur moyenne estimée des fissures était de 0,5  $\mu\text{m}$ .



(a) Texture de surface rugueuse de la fibre d'acier

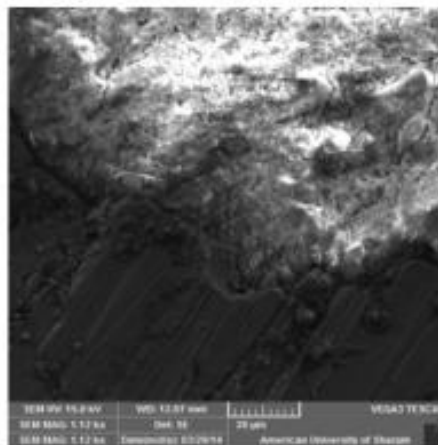


(b) Fibre d'acier identifiée à examiner.



(c) 390X Magn.

(d) 500X Magn.

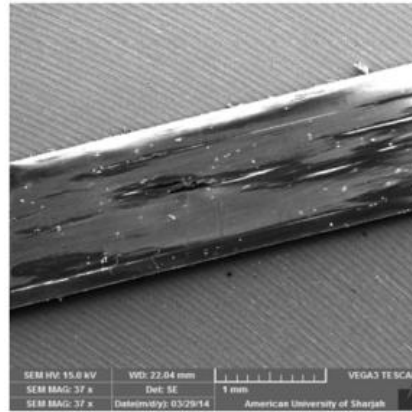


(e) fissure d'interaction dans SFRSCC

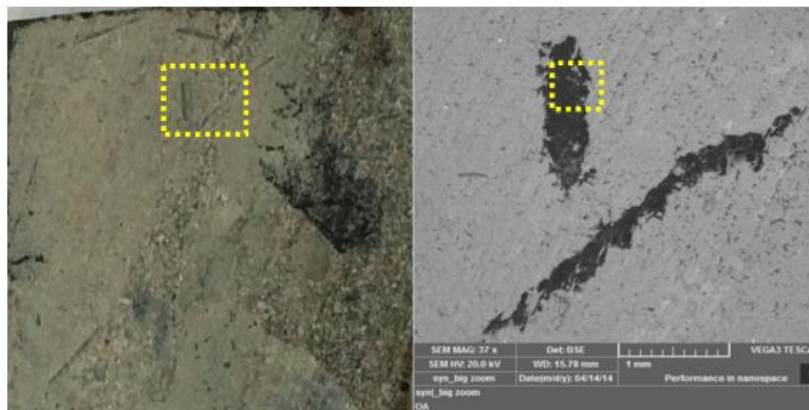
**Figure III-27:** Images SEM d'Échantillon SFRSCC.

- **Interaction pâte cimentaire et fibre synthétique**

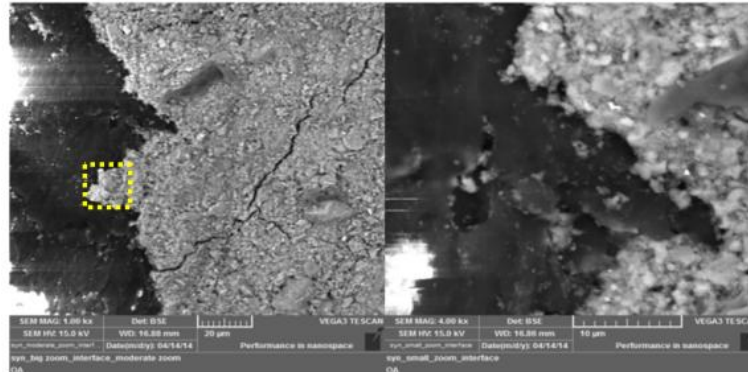
La figure 8 (a) montre la surface lisse d'un filament de fibre synthétique. La figure III-28 (b) illustre une image agrandie 40x avec l'emplacement indiqué des sections transversales latérales et longitudinales différentes de la fibre. Cela représente à son tour une configuration géométrique arbitraire des fibres en raison de leur distribution dans la matrice. Il montre l'interface entre les deux filaments et la pâte de ciment environnante, et l'existence de quelques fissures capillaires. On peut observer à partir des figures III-28 (c) et (d) qu'il y a un verrouillage mécanique resserré notable. De plus, plus de fissures étaient clairement visibles à un grossissement de 1000x par rapport au SFRSCC, et leur largeur moyenne était de 0,4 µm. De même, les fissures se propageaient radialement plutôt que le long des fibres, confirmant une bonne liaison entre les fibres et la pâte de ciment. De plus, aucun effet de paroi n'a été observé autour des filaments de fibres synthétiques par opposition à l'acier des fibres, comme illustré sur la figure III-28 (d).



(a) File de fibres synthétiques



(b) Emplacement général et échantillon identifié



(c) ~1000X Magn.

(d) 4000X Magn.

**Figure III-28:** Images SEM de l'échantillon SyFRSCC.

### III.5.3 Conclusions

Dans cet article, le comportement du FRSCC(BAPF) concernant les propriétés mécaniques et de durabilité a été étudié. Les principales conclusions tirées de cette étude sont:

- Tous les mélanges contenant des fibres ont atteint une fluidité, une capacité de remplissage et une résistance à la ségrégation adéquates. Néanmoins, les fibres synthétiques réduisent la capacité de passage du BAP que la fibre d'acier. Ceci est

attribué à la surface et au rapport d'aspect plus élevés des fibres synthétiques par rapport aux fibres d'acier à un rapport volumétrique similaire ;

- Les fibres ont un effet négligeable sur la résistance à la compression et le module d'élasticité du BAP ;
- Les résistances à la flexion et à la traction de tous les échantillons de BAPF renforcé de fibre d'acier étaient supérieures à celles du mélange témoin de 7% à 26% et de 12% à 79%, respectivement confirmant l'effet positif des fibres sur la propagation des macrocraquelures et la limitation des microfissures. Le module d'élasticité du BAPF(ACIER) n'a pas été significativement affecté ;
- exposer le BAPF (acier) à des cycles humides et secs pendant 21 jours a permis d'améliorer le processus d'hydratation. La résistance à la compression, de résistance à la flexion, résistance à la traction et de module d'élasticité sont augmenté par rapport aux échantillons dans un environnement contrôlé ;
- Tous les mélanges ont présenté une faible perméabilité aux chlorures lorsqu'ils ont été testés en RCPT, confirmant une durabilité adéquate du BAP et du BAPF à cause de la densité élevée du mélange, même au niveau microstructural ;
- La microstructure dépendait de la composition du mélange, La fibre d'acier présentait un effet de paroi avec la pâte de ciment environnante, contrairement à la fibre synthétique ;
- Pour les deux types de fibres, un certain emboîtement a été observé avec le mortier environnant, avec un emboîtement plus prononcé observé entre le béton et les fibres d'acier ;
- En raison de la rigidité plus élevée des fibres d'acier par rapport à la pâte de ciment, des micro-fissures de traction se sont déclenchées pendant l'hydratation ;

**CONCLUSION**

**GÉNÉRALE**

### Conclusion Générale

Le terme béton aujourd'hui, désigne un matériau très différent du matériau gris qui est dans l'esprit du grand public. La résistance, la rigidité, la maniabilité et la durabilité du béton moderne ont conduit à une utilisation élargie du matériau et à de nouvelles opportunités de conception.

De nombreuses structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration d'armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, étalement et air occlus), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de la durabilité.

Ainsi, Le béton autoplaçant (BAP) est un béton innovant qui ne nécessite aucune vibration pour la mise en place. Il est capable de couler sous son propre poids, remplissant complètement le coffrage et réalisant un compactage parfait.

Le béton fibré est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées. L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. Cette influence est en fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement. Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la microfissuration. Donc la fonction principale des fibres dans le béton est de réduire l'ouverture et la propagation des fissures et d'améliorer le comportement fragile du béton vers un comportement plus ou moins ductile.

La partie recherche bibliographique de ce mémoire est une synthèse de cinq travaux de recherche (articles scientifiques) sur les bétons autoplaçant fibrés.

**Le premier article** est une analyse expérimentale, statistique et simulation de l'impact des micro- fibres d'acier sur les bétons autoplaçants contenant des adjuvants.

À partir des résultats et discussions les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'augmentation des micro-fibres d'acier affecte la capacité d'écoulement et de remplissage du béton autoplaçant renforcé par des micro-fibres d'acier.
- L'augmentation des micro-fibres d'acier augmente la résistance à la flexion du béton, jusqu'à 50% -60% et empêche le béton de se rompre par une rupture fragile.

- Le processus d'hydratation se poursuit avec un mélange contenant des ajouts minéraux même après 28 jours de durcissement. Cela se voit dans le gain de la résistance mécanique pour M2, M6, M7 et M8 à 56 jours par rapport à M1, M3, M4 et M5.

**Le second article** est une étude d'un béton autoplaçant fibré pour une application dans l'industrie de préfabrication. Ce manuscrit nous a permis de faire les conclusions suivantes :

- Il était possible d'atteindre une résistance à la compression de 55 MPa à 24 heures ainsi que 94 MPa à 28 jours.
- La petite quantité de fibres métalliques utilisées dans ces compositions n'affectaient pas la maniabilité et augmentaient la résistance mécanique à la compression de 13%.
- Des dosages de fibres plus élevés peuvent et devraient être utilisés pour améliorer la résistance mécanique à la traction, la ductilité et le contrôle de la propagation des fissures.

**Le troisième article** intitulé influence du type et du dosage des microfibrilles sur les propriétés physiques des matrices de mortier renforcées de fibres.

Cette recherche visait à étudier l'influence des fibres d'acier, de polypropylène et des microfibrilles de verre sur les propriétés physiques de FRC (Béton renforcé par des fibres). La matrice cimentaire a été maintenue constante pour faciliter la comparaison des différentes propriétés des matériaux, à savoir l'ouvrabilité, densité, porosité et module de Young, ne variant que le type et le dosage des fibres, ce dernier allant de 0,5% à 2%. Les conclusions suivantes sont mises en évidence :

- La porosité des mélanges renforcés est souvent supérieure à celle mesurée sur le mélange de référence. La modification du type de fibre implique un changement significatif du nombre de fibres dans le mélange. Par conséquent, l'ouvrabilité est fortement affectée et la capacité de compactage des mélanges renforcés est fortement réduite.

Ainsi, de nombreuses poches d'air qui auraient été libérées dans des circonstances normales, rester piégées dans la matrice FRC (Béton renforcé par des fibres), conduisant à la génération de vides d'air à l'état durci et donc à une porosité accrue.

La résistance à la compression des fibres de polypropylène et d'acier semble fortement liée à la porosité, la résistance à la compression augmente avec la diminution de la porosité. Pour les fibres de verre, la résistance à la compression n'augmente que jusqu'à 1%, au-delà de ce dosage elle présente une diminution proportionnelle à la teneur en fibres. Cette singularité se produit très probablement en raison de la perte d'ouvrabilité et de l'augmentation de l'air dans la matrice de béton.

**Le quatrième article** est une évaluation des performances de la fumée de silice et du métakaolin avec des finesses identiques dans les bétons autoplaçants renforcés avec des fibres.

Sur la base de l'étude comparative sur les propriétés du BAPF avec SF et MK par rapport à un BAP, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Dans les deux séries de rapport E/L, MK s'est avéré plus efficace que SF pour réduire le retrait autogène du BAP, et ce résultat s'est avéré valide pendant près d'un an après l'élaboration.
- Les deux additifs minéraux se sont révélés efficaces pour consommer du CH, bien que les résultats du DTA / TGA aient montré que l'addition de MK entraînait un taux de consommation d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca OH}_2$ ) légèrement plus élevé.
- Les résultats de la résistance à la compression ont montré qu'à 10% de remplacement de pouzzolane, l'ajout des deux types d'additifs conduit à une augmentation globale de la résistance à la compression des bétons à tous les âges, bien que MK joue un rôle plus efficace à un âge précoce. Des résistances mécaniques à la compression rapprochées et des modules d'élasticité presque identiques ont été obtenus avec les additions SF et MK.

L'utilisation de fibre d'acier dans le béton autoplaçant avec des rapports de 0,35 E/L a considérablement augmenté les énergies de fracture. Il a été démontré que le BAPF mélangé avec MK avait une énergie de fracture remarquablement plus élevée que le BAPF mélangé avec SF, indiquant que MK offre probablement de meilleures propriétés de liaison entre la matrice et les fibres d'acier.

**Le dernier article** est intitulé évaluation mécanique et durabilité de béton autoplaçant renforcé avec des fibres. Les principales conclusions tirées de cette étude sont :

- Les résistances à la flexion et à la traction de tous les échantillons de BAPF renforcé de fibre d'acier étaient supérieures à celles du mélange témoin de 7% à 26% et de 12% à 79%, respectivement confirmant l'effet positif des fibres sur la propagation des macro-fissures et la limitation des microfissures. Le module d'élasticité du BAPF(ACIER) n'a pas été significativement affecté.

Tous les mélanges ont présenté une faible perméabilité aux chlorures lorsqu'ils ont été testés en RCPT, confirmant une durabilité adéquate du BAP et du BAPF à cause de la densité élevée du mélange, même au niveau microstructural.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [01] Cours de Matériaux de Construction 1, Les Mortiers, disponible à l'adresse URL : <https://ft.univ-setif.dz/externe/departements/gc/cours/mortiers.pdf>
- [02] Système D, Maçonnerie: matériaux, produits, mélanges et proportions, disponible à l'adresse URL : <https://www.systemed.fr/maconnerie-facades/maconnerie-materiaux-produits-melanges-et-proportions,6087.html>
- [03] Norme XP P 10-202 - 1 (DTU 20), Travaux de bâtiment Ouvrages en maçonnerie de petits éléments —Parois et murs,2008.
- [04] NF DTU 26.1, Travaux de bâtiment — Travaux d'enduits de mortiers (indice de classement : P 15-201).
- [05] NF DTU 26.2 :NF P 14-201 (Référence DTU 26.2), Travaux de bâtiment Chapes et dalles à base de liants hydrauliques.
- [06] ASTM C1329-03, Standard specification for mortar cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003,
- [07] EN 197-1, Ciment— Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [08] Centre d'information sur le ciment et ses applications béton. (2005). Fiches techniques tome 1 : Les constituants des bétons et des mortiers. Repéré à <https://www.infociments.fr/ciments/les-constituants-des-betons-et-des-mortiers>
- [09] Le Béton, note sur les pratiques techniques, disponible à l'adresse URL : <https://notech.franceserv.com/beton-materiau.html>.
- [10] Cours matériaux de construction 1, Chapitre 2 : Les granulats pour béton, disponible à l'adresse URL : <https://elearning.univ-bouira.dz/course/view.php?id=1465>.
- [11] NF EN 1008, Eau de gâchage pour bétons— Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.
- [12] Infociments, Eau, disponible à l'adresse URL: <https://www.infociments.fr/betons/eau>, consultée en ligne avril 2018.
- [13] Ahmad, S. and A. Umar (2018). "Fibre-reinforced Self-Compacting Concrete: A Review." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **377**.
- [14] bronzo perasso, Béton fibré, disponible à l'adresse URL : <https://bronzoperasso.fr/produit/beton-fibre/>.

- [15] Pavex.be, Béton autoplaçant, disponible à l'adresse URL : <https://pavex.be/beton-autoplaçant/>.
- [16] Photo, MOHAMED ZEGHAD, Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons : bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP), de doctorat sous la direction de *Safi Brahim*, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2018, p21.
- [17] Pavex.be, Béton fibré, disponible à l'adresse URL : <https://pavex.be/beton-fibre/>.
- [18] Beghoura.imed. Chapitre III Les ajouts minéraux, cours, 42p. Disponible sur : [https://www.academia.edu/25589436/Chapitre\\_III\\_Les\\_ajouts\\_min%C3%A9raux](https://www.academia.edu/25589436/Chapitre_III_Les_ajouts_min%C3%A9raux).
- [19] Portland Cement Association. (2011). Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials. Repéré à <https://faculty.uml.edu/ehajduk/Teaching/14.310/documents/EB001.15.pdf>
- [20] Cstc.be, Des bétons prêts à l'emploi innovants. Le béton renforcé de fibres, disponible à l'adresse URL: <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infociches&ag=71&art=2>, consultée en ligne août 2014.
- [21] Mémoire en ligne, Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance, disponible à l'adresse URL : [https://www.memoireonline.com/01/09/1871/m\\_Fissuration-en-beton-avec-referance-particuliere-au-beton--haute-performance43.html](https://www.memoireonline.com/01/09/1871/m_Fissuration-en-beton-avec-referance-particuliere-au-beton--haute-performance43.html)
- [22] Altoubat, Salah & Lange, David. (2001). Tensile Basic Creep: Measurements and Behavior at Early Age. ACI Materials Journal. 98.
- [23] ASTM C1666 / C1666M-08(2015), Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [24] Infociments, bétons fibrés, Disponible à l'adresse URL : <https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres>.
- [25] Laldji.S. Caractéristiques fondamentales du béton. cours. 42 p. Disponible sur : [https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/125475/mod\\_resource/content/1/CoursB%C3%A9tonETS.pdf](https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/125475/mod_resource/content/1/CoursB%C3%A9tonETS.pdf).
- [26] Alferes Filho, R. S., Motezuki, F. K., Romano, R. C. O., Pileggi, R. G., & Figueiredo, A. D.. (2016). Evaluating the applicability of rheometry in steel fiber reinforced self-compacting concretes. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 9(6), 969-988. <https://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000600008>

- [27] Kasongo.K. Institut des materiaux laboratoire de ma : essais sur beton frais.14 p.Disponible sur l’adresse URL :  
[https://www.academia.edu/10359581/INSTITUT\\_DES\\_MATERIAUX\\_LABORATOIRE\\_DE\\_MATERIAUX\\_DE\\_CONSTRUCTION\\_ESSAIS\\_SUR\\_BETON\\_FRAIS\\_INTRODUCTI\\_ON](https://www.academia.edu/10359581/INSTITUT_DES_MATERIAUX_LABORATOIRE_DE_MATERIAUX_DE_CONSTRUCTION_ESSAIS_SUR_BETON_FRAIS_INTRODUCTI_ON)
- [28] Centre d'information sur le ciment et ses applications béton, Essais de caractérisation spécifiques au BAP, disponible à l’adresse URL :  
<https://www.infociments.fr/betons/essais-de-caracterisation-specifiques-au-bap>
- [29] Ecole polytechnique fédérale de Lausanne département des matériaux, Laboratoire de Matériaux de Construction, Essais sur béton durci et d’un élément en béton arme.
- [30] Athiyamaan, V., & Ganesh, G. M. (2020). Experimental, statistical and simulation analysis on impact of micro steel–Fibres in reinforced SCC containing admixtures. *Construction and Building Materials*, 246, 118450.
- [31] Fernandes, P. A., Veludo, J., Almeida, N., Baptista, J., & Rodrigues, H. (2018). Study of a self-compacting fiber-reinforced concrete to be applied in the precast industry. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), 28.
- [32] Shi C, Wu Z, Lv K, Wu L (2015) A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Constr Build Mater* 84:387–398.
- [33] EN 12350-8 (2010) Testing fresh concrete—part 8: self-compacting concrete—slump-flow test. CEN.
- [34] EN 12390-3 (2012) Testing hardened concrete. Compressive Strength of Test Specimens. CEN.
- [35] Simões, T., Costa, H., Dias-da-Costa, D., & Júlio, E. (2018). Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes. *Construction and Building Materials*, 187, 1277-1285.
- [36] Akcay, B., & Tasdemir, M. A. (2018). Performance evaluation of silica fume and metakaolin with identical finenesses in self compacting and fiber reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 185, 436-444.
- [37] ASTM Standard C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [38] ASTM Standard C128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [39] S. Lenka, K.C. Panda, Effect of metakaolin on the properties of conventional and self compacting concrete, *Adv. Concr. Constr.* 5 (2017) 31–48.

- [40] P. Duan, Z. Shui, W. Chen, C. Shen, Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 1–6.
- [41] Y.W. Chan, S.H. Chu, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1167–1172.
- [42] Yehia, S., Douba, A., Abdullahi, O., & Farrag, S. (2016). Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 120-133.