

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

Mohamed Boudiaf

Faculté d'Architecture et de Génie civil

Département de Génie civil

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat « LMD » en Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par :

Melle Imene BENAÏSSA

THÈME

**« BÉTON DE SABLE FIBRÉ PROJETÉ POUR
PANNEAU 3D »**

Dirigée par :

Monsieur NASSER Bachir et Madame AGGOUN Salima

Soutenue publiquement le 29 octobre 2015

Devant le jury composé de :

Mr Mohamed TEHAMI	Pr/USTO	Président de Jury
Mr Bachir NASSER	MCA/USTO	Directeur de thèse
Mme Salima AGGOUN	MC/HDR/U.Cergy Pontoise, France	Co-Directrice de thèse
Mme Nadia BELAS	Pr/U. Mostaganem	Rapporteur
Mr Ouali AMIRI	Pr/Polytech Nantes, U.Nantes	Examineur
Mr Mebrouk HAMANE	Pr/USTO	Examineur

Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus vifs à mes deux encadreurs de thèse, Madame Salima AGGOUN et Monsieur Bachir NASSER pour avoir accepté de diriger les travaux de cette thèse. Leur contribution au suivi de ce travail a été décisive à l'accomplissement de l'objectif visé à travers ce mémoire.

Que Monsieur Mohamed TEHAMI trouve ma gratitude pour avoir accepté de présider le jury de délibération de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également aux examinateurs Madame Nadia BELAS, Messieurs Ouali AMIRI et Mebrouk HAMANE pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je ne saurais oublier Madame Souad MALAB pour avoir contribué à l'analyse des résultats expérimentaux des retraits.

Que ceux qui ont contribué à ma formation durant mes parcours de Licence et de Master trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Que mon père Monsieur Abdelatif trouve ici aussi ma reconnaissance pour m'avoir fait découvrir le vaste monde du génie civil et de m'avoir incitée à suivre la voie que j'ai suivie. Son apport dans l'élaboration du corpus expérimental a été un atout certain pour la réussite de ce travail.

Enfin, je ne saurais oublier le soutien moral apporté par ma famille et mes amis durant tous mes cycles de formation.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
SOMMAIRE	3
RESUME	7
ABSTRACT	9
ملخص	11
INTRODUCTION GENERALE	14
Problématique.....	14
Piste de réflexion.....	15
Structure du mémoire de thèse.....	16
CHAPITRE 1-BIBLIOGRAPHIE	18
Introduction	18
1.1 Le béton projeté	18
1.1.1 Historique	18
1.1.2 Définition	19
1.1.3 Domaines d’application.....	19
1.1.4 Avantages et inconvénients des bétons projetés.....	20
1.1.5 Techniques de projection.....	20
1.1.5.1 Voie sèche.....	20
1.1.5.2 Voie mouillée.....	21
1.1.6 Composants du béton projeté.....	22
1.1.6.1 Ciment.....	22
1.1.6.2 Granulats	22
1.1.6.3 Sable.....	22
1.1.6.4 Adjuvants.....	23
1.1.6.5 Fibres.....	23
1.1.6.6 Eau.....	24
1.1.7 Formulation des bétons projetés.....	25
1.1.7.1 Passage dans la machine	25
1.1.7.2 Arrangement du béton sur le support.....	26
1.1.8 Propriétés des bétons projetés.....	27
1.1.8.1 A l'état frais	27

1.1.8.2 A l'état durci	30
1.2 Bétons de sable	34
1.2.1 Définition.....	34
1.2.2 Historique.....	34
1.2.3 Domaines d'utilisation.....	34
1.2.4 Formulation d'un béton de sable	34
1.2.5 Caractéristiques des bétons de sable.....	35
1.2.5.1 Granulométrie/maniabilité.....	35
1.2.5.2 Retrait et fluage.....	35
1.2.6 Durabilité des bétons de sable.....	38
1.3 Panneau 3D	38
1.3.1 Historique	38
1.3.2 Description du système	38
1.3.3 Avantages du procédé EVG.....	40
1.3.3 Domaines d'utilisation.....	40
1.3.5 Panneau 3D en Algérie.....	40
Conclusion	41
CHAPITRE 2- MATERIAUX, METHODES ET FORMULATION DES BETONS ETUDIÉS	44
Introduction	44
2.1 Matériaux	45
2.1.1 Ciment	45
2.1.2 Fillers calcaires	45
2.1.3 Sable.....	45
2.1.4 Gravillons.....	45
2.1.5 Adjuvants.....	46
2.1.6 Fibres métalliques.....	46
2.2 Procédures expérimentales	47
2.2.1 Essai d'étalement.....	47
2.2.2 Essai de compression.....	48
2.2.3 Essai de traction.....	48
2.2.4 Modules d'élasticité.....	49
2.2.5 Flexion	50

2.2.6 Essai de retrait.....	50
2.2.7 Porosité.....	51
2.2.8 Porométrie.....	51
2.4 Formulation des bétons étudiés.....	52
2.4.1 Principe de formulation du béton de sable projeté [BSP].....	52
2.4.2 Formulation du béton ordinaire projeté [BOP].....	54
2.4.3 Formulation du béton vibré [BV].....	55
2.4.4 Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons d'essais.....	55
2.4.5 Analyse de la formulation du BSP.....	57
Conclusion.....	57
CHAPITRE 3-COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE PROJETE [BSP] A L'ETAT FRAIS	60
Introduction.....	60
3.1 Choix de la méthode de projection des bétons projetés [BSP et BOP].....	60
3.1.1 Béton ordinaire projeté [BOP].....	60
3.1.2 Béton de sable projeté [BSP].....	61
3.2 Optimisation des formulations BSP et BOP par ajout de fibres.....	61
3.2.1 Dosage en fibres métalliques du BSP.....	62
3.2.2 Dosage en fibres métalliques du BOP.....	62
3.3 Effet des fibres métalliques sur la projection.....	64
3.4 Caractérisation des bétons d'essais à l'état frais (avant projection).....	64
3.4.1 Caractérisation avant la projection.....	64
a) Béton de sable projeté.....	64
b) Béton ordinaire projeté.....	67
c) Béton vibré	67
3.4.2 Caractéristiques à la sortie de la lance des bétons de sable et ordinaire projetés.....	67
3.4.3 Qualité de surface.....	66
3.4.4 Epaisseur des couches du béton projeté.....	68
3.4.5 Pertes par rebond.....	69
3.4.5.1 Pertes par rebond du béton.....	70
3.4.5.2 Caractérisation des rebonds.....	70
3.4.5.3 Perte par rebond des fibres.....	72

Conclusion	72
CHAPITRE 4-COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE PROJETE A L'ETAT DURCI	75
Introduction	75
4.1 Résistance à la compression	75
4.2 Résistance à la traction	77
4.3 Module d'élasticité	79
4.4 Essai de flexion	79
4.5 Retrait endogène	81
4.6 Retrait de dessiccation	82
4.7 Analyse comparative de la cinétique du BSP avec celle du BV	83
4.8 Effet de la répartition des tailles des pores	85
4.9 Analyse comparative des retraits de dessiccation des BSP et BOP	88
4.10 Effet des fibres métalliques [FM] sur le retrait de dessiccation	89
4.11 Retrait endogène vs retrait de séchage	90
4.11.1 Retrait total.....	90
4.11.2 Analyse comparative entre les retraits endogène et de dessiccation.....	91
Conclusion	91
CONCLUSION GENERALE	93
Contexte de la thèse.....	93
Contribution.....	93
Perspectives.....	94
Références bibliographiques	97
Liste des figures	102
Liste des tableaux	104

Résumé

Les travaux de recherche entrepris dans le cadre de cette thèse sont destinés à permettre de démontrer que dans la technique de projection, le béton de sable fibré peut remplacer le béton ordinaire habituellement utilisé.

La technique de projection du béton est notamment utilisée dans les travaux de soutènement et de tunnels, la stabilisation des pentes mais aussi dans la conception des panneaux 3D.

Le béton utilisé, à ce jour, dans la technique du béton projeté dans la conception des panneaux 3D est à base de gravillons 3/8 mm. Cependant, l'inconvénient avec ce mélange, c'est les pertes par rebond du matériau et des fibres qui sont importantes (jusqu'à 50%), d'où un impact économique défavorable et une influence négative sur les propriétés mécaniques du matériau en place sur le support.

Le béton de sable composé d'un faible dosage en ciment, sable et une grande quantité de fines calcaires semble tout à fait indiqué pour pallier ce problème, étant donné les avantages que procurent sa finesse, cohésion, fluidité et homogénéité. Dans le cadre de cette étude, les performances du béton de sable projeté (BSP) ont été comparées à celles du béton ordinaire projeté (BOP). Pour le retrait, le comportement a aussi été confronté à celui du béton vibré. Les paramètres de comparaison ont concerné l'état frais (avant, pendant et après projection) et l'état durci, avec une attention particulière portée aux taux de rebond des matériaux, aux résistances mécaniques et aux retraits (endogène et de dessiccation).

Les résultats de nos investigations ont mis en évidence un certain nombre d'avantages du BSP par rapport au BOP. A cet effet, notons la réduction des pertes par ricochet des matériaux (béton et fibres) de moitié, avec des épaisseurs de couches de béton projeté de 9 cm contre 6 cm pour le BOP. L'autre point positif, c'est la qualité du fini de surface. Du point de vue de la résistance à la compression, le BSP présente une amplitude plus importante au jeune âge, mais équivalente à long terme. Le retrait endogène du BSP est similaire à ceux des BOP et des bétons vibrés (BV), aussi bien en amplitude qu'en cinétique. Quant au retrait de dessiccation, le BSP manifeste une déformation de l'ordre de 10% plus élevée que celle du BOP. Alors que par rapport au BV, la magnitude de la déformation du BSP est plus petite que celle du BV, et ce en dépit d'une perte d'eau par évaporation plus importante. Par conséquent, et en opposition à la majorité des résultats de la littérature, une perte de poids plus importante par dessiccation, n'implique pas systématiquement une déformation de retrait plus importante. L'autre résultat inattendu est que la structure monomodale de type « méso » du BSP est

affectée par une cinétique de séchage plus rapide que la structure bimodale de type « macro » et « méso » du BV.

Par ailleurs, l'ajout de 50 kg/m^3 de fibres métalliques au BSP réduit le retrait de dessiccation de 16 %, alors que leur influence semble ne jouer aucun effet sur la cinétique ou la magnitude de la déformation du BOP, du moins dans les proportions du dosage utilisé.

La proportion de mésopores semble un facteur décisif dans le comportement des retraits de dessiccation des bétons. Dans ce contexte, une explication est fournie pour mettre en relief les raisons du retrait moins important du BSP par rapport au BV, malgré une perte d'eau par séchage plus importante et un volume de pâte plus important.

Mots clés : béton de sable, béton ordinaire, béton vibré, rebond, fibre, retrait endogène, retrait de dessiccation, porosimétrie, mésopore, macropores, dessiccation.

Abstract

This paper presents test results of mechanical properties of fibre reinforced sand-concrete (BSP) formulated to be used in the sprayed wet-mix process, as a substitution to fibre reinforced concrete (BOP) sprayed by dry-mix process. This process of application of concrete is suitable for diverse applications such underground support and slope stabilization. In BOP, formulated with aggregates up to 8 mm, both material and fibre rebounds are high (50 %); this results in economic implications, and affects the performances of the mixture negatively.

BSP formulated with low dosage of cement, sand and high content of limestone filler, but without coarse aggregate; seems to be indicated to alleviate most of these problems, because of its fineness, high cohesiveness, high fluidity and better homogeneity. BSP was investigated and compared with BOP, on the basis of fresh and hardened properties with special emphasis on rebound, compressive strength and drying shrinkage. Results of investigations showed many advantages of this new mixture (BSP) when compared to BOP: reduction of material and fibre rebounds by approximately 50%, relatively substantially thicker layers (9 cm vs 6 cm), good finishing surface, higher early age compressive strength, and long term drying shrinkage close to that of BOP.

Comparison of the results shows that the endogenous shrinkage of BOP, BSP and vibrated concrete (BV) is similar.

On the other hand, the present study showed that a low amount of steel fibre (50 Kg/m^3) reduces the drying shrinkage of BSP by approximately 16%. While, in the case of BOP, the influence is not significant.

The aim of this study is to bring some answers to the questions about the delayed deformation of the shooting sand-concrete [BSP], which is made of aggregates up to 5 mm.

Drying shrinkage results, revealed that drying shrinkage of BSP is higher than that of BV in the short term. In the long term, it becomes lower than that of BV. However, the BSP loses more water during the period of shrinkage measurements than BV. Furthermore, pore size distribution shows that the mesoporous structure of BSP lost more water than the bimodal structure of BV, which includes macropores and mesopores. These particular porometric structures of BSP and BV are the main factor behind the difference of the drying shrinkage behaviour of the two mixtures.

This is an interesting and unexpected result, which is not in accordance with the commonly accepted relationship between shrinkage and weight change of samples, and between moisture

loss and porometric structure. This work provides an explanation for this phenomenon by taking into account the kinetics of drying and the porometry of the concrete.

Key words: sand-concrete, ordinary concrete, vibrated-concrete, rebound, fibre, endogenous shrinkage, drying shrinkage, porosimetry, mesopore, macropores, dessication.

ملخص

الهدف من البحوث التي أجريت في إيطار هذه الأطروحة هو تبيان أنه في تقنية رش الخرسانة بإمكاننا استبدال الخرسانة العادية بالخرسانة الرملية المقواة بالألياف.

تستعمل تقنية رش الخرسانة خصوصا في أشغال دعامة الجدران و الأنفاق، تحقيق استقرار المنحدرات كما تستعمل أيضا في تصميم اللوحات ثلاثية الأبعاد (3D).

الخرسانة المستعملة إلى يومنا هذا في تقنية الرش في تصميم اللوحات ثلاثية الأبعاد مكونة أساسا من حصى 8/3 مم. إلا أن النقطة السلبية بالنسبة لهذا المزيج هي الخسائر الكبيرة الناتجة عن المواد المرتدة للخليط و الألياف (تصل إلى 50%) مما ينتج عنه تأثير سلبي من الناحية الاقتصادية و كذا على الخواص الميكانيكية للخرسانة الموضوع على اللوحات 3D. استعمال خرسانة رملية مكونة من كمية منخفضة من الاسمنت و الرمل و كمية كبيرة من المواد الناعمة الكلسية يبدو مناسباً لمعالجة هذا الاشكال نظرا للايجابيات الناتجة عن النعومة، التماسك، السيولة و التجانس.

من خلال الأبحاث التي أجريناها، قمنا بمقارنة خواص الخرسانة الرملية المرشحة (BSP) بخواص الخرسانة العادية المرشحة (BOP) كما قمنا بمقارنة تقلص BSP بالخرسانة المرجة (BV). تمت المقارنة في الحالة الطازجة للخرسانة (قبل، أثناء و بعد الرش) و في الحالة الصلبة. كما ركزنا كذلك على المواد المرتدة للمزيج، المقومات الميكانيكية و التقلصات (التقلص الداخلي و التقلص التجفيفي).

النتائج التي حصلنا عليها أظهرت العديد من النقاط الايجابية بالنسبة لـ BSP مقارنة بـ BOP، نذكر من بينها، انخفاض نسبة الخسائر الناتجة عن المواد المرتدة (الخرسانة و الألياف) بـ 50% مع سمك يقدر بـ 9 سم بالنسبة لطبقات BSP و 6 سم بالنسبة لطبقات BOP، نقطة إيجابية أخرى هي جودة نوعية المساحة السطحية للخرسانة. بالنسبة للمقاومة للضغط، فإن BSP يمثل مدى تشوه أكبر في سن مبكر لكن يصبح مماثل على المدى البعيد.

التقلص الداخلي لـ BSP هو مماثل للتقلص الداخلي لـ BOP و BV سواءا بالنسبة لمدى التشوه أو سرعة تطوره. أما في ما يخص التقلص التجفيفي فإن BSP يظهر تشوه أكبر بحوالي 10% مما هو عليه بالنسبة لـ BOP لكن أصغر من BV، و هذا إضافة إلى ضياع نسبة كبيرة من الماء عن طريق التبخر.

بالتالي، و على عكس معظم النتائج المحصل عليها من طرف بعض الباحثين، فإن خسارة أكبر للوزن عن طريق التجفيف لا تعني اجباريا تقلص أكبر. نتيجة أخرى غير متوقعة هي أن الهيكل أحادي المسامية ذات

نوع « meso » لـ BSP لها سرعة تجفيف أكبر من تلك التي للهيكل ثنائي المسامية ذات نوع

« meso » و « macro » لـ BV.

علاوة على ذلك، فإن إضافة 50 كغ/م³ من الألياف الحديدية للخرسانة الرملية المرشحة تنقص التقلص

التجفيفي بنسبة 16% في حين أنه لا يبدو لها تأثير على مدى التشوه و سرعته للخرسانة العادية المرشثة. نسبة المسامية ذات نوع « meso » تبدو عاملا حاسما في سلوك التقلص التجفيفي للخرسانات. في هذا السياق هناك تفسير مقدم من أجل تسليط الضوء على أسباب التقلص المنخفض للخرسانة الرملية المرشثة مقارنة بالخرسانة المرجة، رغم خسارة نسبة كبيرة للماء بالتجفيف و حجم أكبر للعجينة.

كلمات مفتاحية: خرسانة رملية، خرسانة عادية، خرسانة مرجة، مواد مرتدة، ألياف، تقلص داخلي، تقلص تجفيفي، مسامية، مسامية meso، مسامية macro.

**INTRODUCTION
GENERALE**

INTRODUCTION GENERALE

Problématique

La technique de projection joue un rôle significatif dans la technologie moderne des bétons en offrant de nombreux avantages. Elle est utilisée dans les constructions souterraines, la stabilisation des pentes et talus ; ainsi que dans les travaux de réparation et de renforcement des structures. Depuis une trentaine d'années, l'usage du béton projeté est aussi utilisé dans la conception des panneaux tridimensionnels servant à la réalisation d'ossatures.

Cependant, l'inconvénient avec ce matériau c'est que les tests ne peuvent être tous réalisés dans des conditions de laboratoire. Par conséquent, l'essentiel des résultats que rapporte la littérature sont réalisés sur chantier, ce qui rend leur exploitation plus difficile. La plupart des investigations sur ce matériau sont orientées sur le choix de la technique de projection (voie sèche ou humide), les formulations et l'influence des différentes composantes [Austin et al., 1997 ; Austin et Robins, 1995 ; Bindiganavile et Banthia, 2001 ; Jolin et al., 1999 ; Leung et al., 2005]. D'autres travaux ont porté sur les équipements utilisés pour la projection et l'adhésion du matériau sur le substrat [Malmgren et al., 2005 ; Leung et al., 2005 ; Pfeuffer et Kusterle, 2001].

En outre, les opérateurs s'interrogent sur les déformations différées de ce matériau, en raison de leurs effets sur le comportement des structures. Le peu de résultats disponibles [Ansell, 2010 ; Malmberg, 1977] apporte quelques réponses, mais assez éparpillées pour conduire à des conclusions générales sur ce phénomène. Les travaux effectués concernent des mélanges à base d'agrégats de dimensions 3/10 mm. Les retraits enregistrés étaient 10 à 15% plus élevés que dans le cas du béton vibré de même classe de résistance, comme rapporté par Wolsiefer et Morgan (1993). Cet état de fait rend les opérateurs très réticents quant à l'usage de ce matériau dans le génie civil.

Une nouvelle formulation de béton à projeter par voie humide a été proposée par Benaïssa et al. (2008) pour la réalisation des panneaux 3D. Ce mélange était composé de ciment, sable (0/5 mm), filler (0/80 μm), eau et superplastifiant. Pour éviter toute confusion, notons que ce mélange diffère notablement du mortier par les dosages en ciment et eau. Par ailleurs, les résistances mécaniques sont dans la plage de ce que l'on obtient habituellement dans la gamme des bétons ordinaires. Il en est de même pour les déformations différées.

Les tests effectués par l'auteur ont montré que ce nouveau mélange offrait beaucoup d'avantages : un meilleur fini de surface des couches du béton projeté, des couches plus épaisses, des pertes par rebond réduites et donc un impact environnemental et écologique favorable, grâce à l'utilisation éventuelle de dépôts importants de sable et de la rareté des gros granulats dans certaines régions, comme dans le grand Sahara algérien (2 millions de km²).

A l'instar du béton ordinaire projeté, les opérateurs activant dans le secteur du génie civil s'interrogent sur les retrait et fluage de ce matériau, appelé béton de sable, ainsi que sur ses performances à l'état frais et durci.

Dans ce contexte, un large programme expérimental a été développé dans notre étude pour mettre au point une formulation de béton de sable adaptée à la projection avec la technique de mise en place la plus appropriée (voie humide ou sèche). Des investigations ont été conduites pour suivre son comportement à l'état frais (avant, pendant et après projection) et durci, y compris les retraits endogène et de dessiccation.

L'étude a été comparative avec une formulation habituellement utilisée par voie sèche dans la conception des panneaux 3D. Cette composition est constituée des mêmes ingrédients que ceux utilisés dans les bétons ordinaires avec cependant, des agrégats limités en diamètre à 8 voire exceptionnellement 10 mm.

Pour une meilleure approche de la compréhension de la cinétique de retrait, la cinétique de dessiccation a été analysée, ainsi que l'étude de l'influence de la porométrie sur les amplitudes de déformation.

Piste de réflexion

La mise en place du programme de recherche en collaboration avec le laboratoire L2MGC de l'université de Cergy Pontoise/France et la pleine collaboration de l'entreprise « BEGHEZA CONTRACTOR » a permis une étude approfondie du béton de sable fibré projeté par voie humide.

L'objectif visé à travers cette recherche est d'aboutir à une caractérisation non exhaustive mais assez complète du béton de sable projeté par voie humide pour :

- Présenter une formulation adaptée à la projection.
- Caractériser la pompabilité et la projectabilité du mélange.
- Evaluer les qualités des couches projetées (fini de surface et épaisseur).
- Evaluer les rebonds des différents ingrédients.
- Evaluer les performances mécaniques à l'état frais et durci.

- Evaluer les retraits endogène et de dessiccation.

Structure du mémoire de thèse

Le mémoire est composé, après la présentation d'un résumé des résultats obtenus et une introduction, des chapitres suivants :

- Synthèse bibliographique des connaissances sur le béton projeté.
- Matériaux, méthodes et formulation des bétons étudiés.
- Caractérisation du béton de sable projeté à l'état frais.
- Caractérisation du béton de sable projeté à l'état durci.

Enfin une conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE 1

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1 –BIBLIOGRAPHIE

Introduction

Le panneau 3D au béton de sable fibré projeté combine des techniques de construction relativement récentes et/ou peu utilisés. En effet, le panneau 3D a été introduit en Algérie depuis une vingtaine d'années dans le bâtiment, avec, cependant, peu de vulgarisation. Si tel qu'il est conçu, le panneau 3D utilise du béton à base de gravillons 3/8 mm, l'usage du béton de sable fait l'objet de peu d'enthousiasme de la part des promoteurs. Pour toutes ces raisons, la bibliographie s'intéressera au développement du béton projeté avec et sans fibres, du béton de sable projeté et du panneau 3D.

A noter que très peu d'études abordant le panneau 3D et le béton de sable fibré projeté ont été menées et publiées. C'est la raison pour laquelle, l'essentiel de la bibliographie portera sur le béton, à base de gravillons 3/8 mm, projeté avec ou sans fibres. Ceci nous permettra de situer certains de nos résultats, à défaut de pouvoir les situer par rapport à du béton projeté de même nature.

1.1 Le béton projeté

1.1.1 Historique

L'idée de projeter du mortier revient au naturaliste américain Carl Akeley qui, en 1907, a créé une machine à projeter afin de construire des rochers artificiels dans un zoo. Et c'est dès 1911 que son utilité s'est avérée dans le domaine du génie civil, notamment pour la stabilisation des berges de la tranchée « Culebra cut » du canal de Panama.

Le principe consistait à faire passer un mélange de matériaux sec (ciment, sable et gravillons) dans deux chambres pressurisées alternativement avant de le transporter jusqu'à la lance où il était mouillé, puis de le projeter sur un support; c'est la projection par voie sèche. Puis, en 1940, un nouveau procédé, qui est le procédé par voie mouillée, voit le jour s'appuyant sur le principe de la vis d'Archimède et autorisant un chargement en continu des matériaux et permettant un débit de projection plus élevé.

C'est finalement avec l'apparition en 1947 de la machine à rotor en remplacement de la vis que naît vraiment le béton projeté moderne. Tout en gardant l'intérêt du chargement continu et des débits élevés, cette nouvelle technique autorise des distances machine-projection plus longues.

Le béton projeté est très certainement le matériau qui suscite le plus d'intérêt dans le monde des tunnels. Dès son apparition, il est apparu comme une solution pratique au renforcement des voûtes des mines par sa facilité, et sa flexibilité d'emploi.

1.1.2 Définition

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance par projection sur un support au moyen d'un jet d'air comprimé. Le compactage est réalisé par la projection du béton. Le béton projeté permet de réaliser les formes les plus complexes sans l'utilisation de coffrages, telles que dômes, coques, etc. Il est le plus souvent utilisé dans les travaux souterrains ou en technique de réparation ou de soutènement, ainsi que dans la conception des panneaux 3D.

Le mélange à projeter peut être préparé sur chantier, en usine où dans une centrale à béton.

L'avantage de la méthode est de pouvoir utiliser les matériaux locaux, et les matériaux que constituent les déchets naturels et industriels (fines, pouzzolane, cendre volante, laitiers, etc...) limitant ainsi les frais de transport. Son utilisation représente donc généralement un avantage économique.

1.1.3 Domaines d'application

L'utilisation du béton projeté est justifiée dans plusieurs cas par sa méthode de mise en place unique, qui élimine les coffrages complexes et permet des formes variées. Le béton projeté peut être utilisé :

- Pour le recouvrement de murs ou d'éléments de structures, en extérieur comme en intérieur.
- Dans les nouvelles constructions tels que stabilisation des pentes, revêtements de parois de tunnels, piscines et toutes autres constructions en béton.
- Pour l'exécution d'un revêtement définitif, il est utilisé lorsqu'une solution par coffrage est délicate à mettre en place.
- En travaux souterrains, en réparation provisoire en tant que membrane de protection ou de soutènement ou en revêtement définitif dans un rôle structurel.
- Dans les travaux de réparations des éclatements du béton d'enrobage.
- Ouvrages sur talus et blindages de fouilles.
- Pour le renforcement de murs en béton armé.
- En réfection de parois de béton endommagé par des incendies.
- Pour la construction d'ouvrages en béton de forme libre.

1.1.4 Avantages et inconvénients des bétons projetés

Par rapport au béton coffré, le béton projeté présente plusieurs avantages, tels que la flexibilité d'emploi, la rapidité d'exécution, l'exécution de voile mince de grande surface, la protection des talus, bonne adhésion à l'état plastique, résistance au lessivage, faible retrait, faible perméabilité, résistance élevée aux attaques des sulfates. Quant aux inconvénients, citons le coût élevé par rapport au béton traditionnel.

1.1.5 Techniques de projection

Il existe principalement deux techniques distinctes de projection du béton ; projection par voie sèche et projection par voie mouillée.

1.1.5.1 Voie sèche

Cette technique est envisageable le plus souvent pour les travaux de réparations. Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur sans eau. Il est propulsé par air comprimé le long d'une tuyauterie vers la lance de projection. L'eau arrive séparément à la lance en quantité nécessaire et réglable pour assurer l'humidification du mélange au moment de la projection sur le support (Figure 1.1).

Cette méthode permet d'atteindre de grandes distances de projection par rapport à la voie humide.

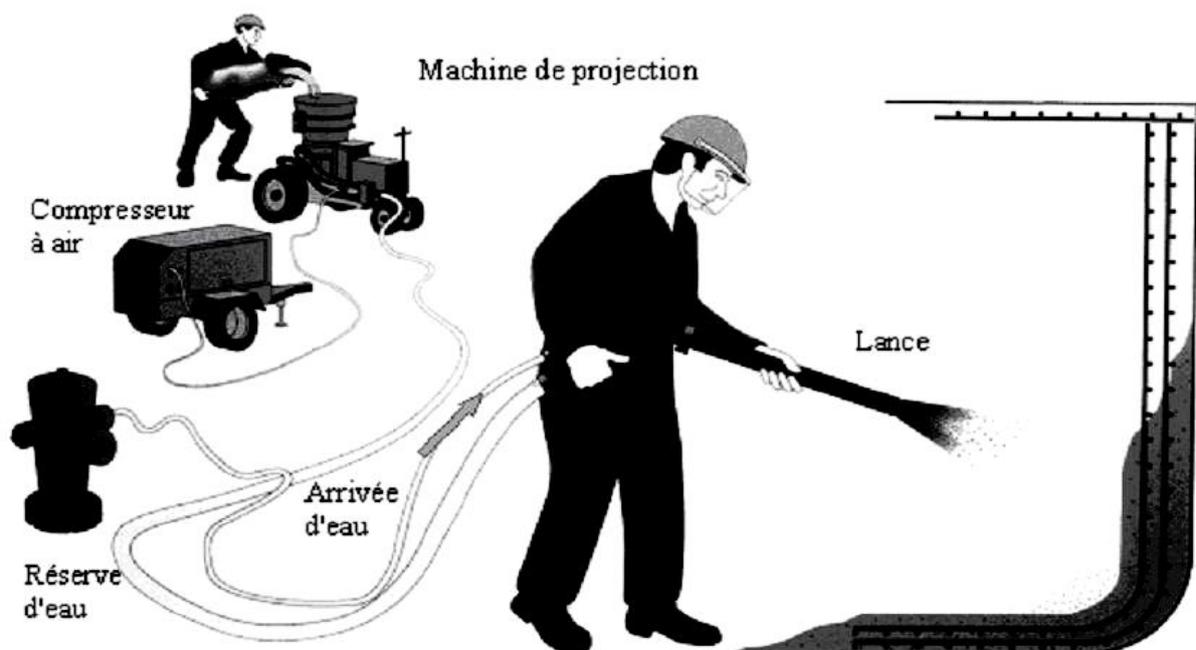


Figure 1.1 Procédé de projection par voie sèche.

Avantages et inconvénients de la projection par voie sèche

Comme avantages, citons la facilité et flexibilité d'application, la possibilité d'arrêter le procédé et le reprendre à tout moment durant les travaux, un faible rapport Eau/Liant et par conséquent, obtention facile de résistances élevées. Quant aux inconvénients, il y a lieu de former particulièrement les portes-lance. Par ailleurs, le contrôle de la qualité est assez complexe.

1.1.5.2 Voie mouillée

Contrairement à la voie sèche, la voie mouillée consiste à introduire l'eau dans le mélange avant son déversement dans la machine, c'est-à-dire au moment de son malaxage. Il est ensuite pompé dans un boyau et projeté à haute vitesse. La projection est assurée par de l'air comprimé éventuellement associé à des adjuvants liquides (Figure 1.2).

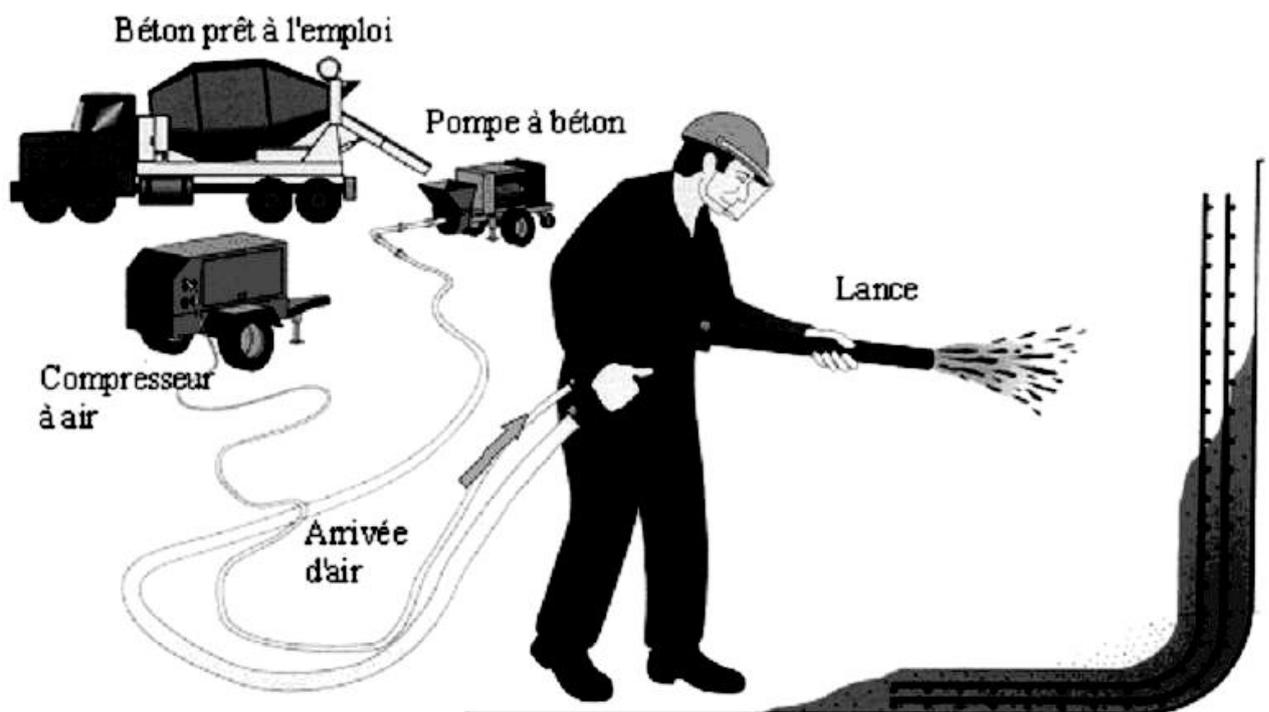


Figure 1.2 Procédé de projection par voie mouillée.

Cette technique est utilisée en particulier pour la réalisation de travaux souterrains ou de travaux d'assainissement, aussi bien en travaux neufs qu'en réparation d'ouvrages anciens.

Avantages et inconvénients de la projection par voie mouillée

L'augmentation de la capacité de production et la faible quantité de poussières constituent des atouts certains. Par contre, la grande quantité de ciment induit des retruits importants, les distances de pompages sont limitées et le coût des équipements est élevé.

1.1.6 Composants du béton projeté

1.1.6.1 Ciment

Les deux types de ciment les plus souvent utilisés en béton projeté sont le ciment Portland ordinaire et le ciment Portland à haute résistance initiale. La différence entre ces deux types de ciment est la finesse des grains de ciment qui est plus faible dans le cas du ciment Portland ordinaire.

1.1.6.2 Granulats

La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation. En béton projeté par voie sèche, la distribution granulométrique du béton a surtout un effet sur le rebond. La composition du béton avant la lance et la composition en place du béton doivent également être prises en compte. Evidemment, les différentes tailles de particules ne rebondissent pas de la surface à des taux équivalents. Une bonne distribution granulométrique avant projection permet d'obtenir un béton projeté en place durable et bien compacte. Jolin et al. (1999) ont confirmé que la granulométrie recommandée l'ACI (1995) est la granulométrie optimale, pour le béton projeté par voie sèche. L'optimisation granulaire du mélange permet de réduire considérablement les rebonds et donc de mieux contrôler la composition du béton en place dont la composition est proche du mélange initial, elle est aussi valable pour le béton projeté par voie humide [ACI, 1995].

1.1.6.3 Sable

Compte tenu de l'importance de la propreté des sables, la valeur exigée pour l'équivalent de sable visuel doit être supérieure ou égale à 85. Cette valeur conditionne les critères de qualité du béton projeté ainsi qu'un bon passage en machine. Elle est indispensable pour les résistances supérieures ou égales à 40 MPa.

- Granulométrie du sable

Les propriétés du béton ne sont pas impactées par la granulométrie du sable. Cependant, l'utilisation d'un sable dont le module de finesse est plus élevé, peut améliorer la résistance au gel-dégel en présence de sels fondants. Il est difficile d'expliquer les phénomènes en cause, mais il est probable qu'il s'agit de phénomènes reliés à la projection qui modifient la structure interne du béton durci.

1.1.6.4 Adjuvants

Les différents produits utilisés doivent être compatibles avec les autres composants du béton.

Parmi les adjuvants et ajouts les plus utilisés en béton projeté, on peut citer :

- **Les fluidifiants:** souvent des super-plastifiants, permettent d'augmenter la plasticité des mélanges à projeter par voie mouillée sans accroître la teneur en eau.

- **Les accélérateurs de prise ou raidisseurs:** engendrent des prises très rapides (souvent moins d'une minute). Ils sont utilisés afin d'assurer la tenue du béton sur le support (voie mouillée) ou pour augmenter les épaisseurs de projection (voie sèche).

Cependant, Ils peuvent avoir certains inconvénients sur la durabilité du béton projeté, comme le démontre Jolin (1996). En outre, ils affectent la microstructure de la pâte de béton ce qui modifie les propriétés mécanique et la porosité du béton. Ces inconvénients peuvent être résolus par l'utilisation de fumée de silice qui permet généralement de produire des bétons de bonne qualité malgré l'utilisation d'accélérateurs.

- La fumée de silice

L'utilisation de la fumée de silice dans le béton projeté diminue la quantité de rebond et permet de projeter des couches de béton plus épaisses ce qui permet d'augmenter la productivité et de réduire les coûts de production. La fumée de silice dans le béton projeté permet également d'améliorer les propriétés physiques du béton (résistance en compression, résistance au gel-dégel, résistance à la pénétration des ions chlore, etc...).

La fumée de silice joue également un rôle sur les propriétés du béton durci. La meilleure répartition des hydrates réduit la perméabilité du béton et améliore la qualité de l'interface pâte-granulat.

1.1.6.5 Fibres

La composition d'un mélange avec introduction de fibres doit tenir compte des pertes en fibres lors de la projection ce qui conduit à un surdosage qui est fonction du type de fibres.

Les fibres les plus employées dans les bétons projetés sont les fibres métalliques et les fibres polypropylènes. Elles sont utilisées pour répondre à différentes attentes.

- Fibres métalliques

L'ajout de fibres métalliques dans les bétons projetés contribue à l'amélioration de la ductilité de ceux-ci ainsi qu'au renforcement de la structure, il permet également de diminuer la fissuration causée par le retrait plastique et d'augmenter les propriétés mécaniques en post-fissuration. De plus, les fibres métalliques permettent de réaliser des surfaces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une grande liberté architecturale. L'utilisation de

fibres aide donc le béton à supporter des charges importantes même après la formation de fissures.

Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton.

Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu.

Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

L'efficacité des fibres est directement reliée à leur capacité à intercepter les fissures.

L'orientation des fibres est donc importante, car les fissures structurales apparaissent à des endroits et orientations bien précises selon le type de sollicitation. Ainsi, sur une poutre en béton armé sollicité en flexion positive, les fissures apparaîtront à la face inférieure de la poutre, perpendiculaire au champ de contrainte. L'orientation des fibres peut être contrôlée, dans une certaine mesure, par les techniques de mise en place.

Lors de la projection, les fibres s'alignent parallèlement au substrat dans un plan en deux dimensions.

- Fibres en polypropylènes

Dans le béton, les fibres de polypropylène sont utilisées afin de diminuer la fissuration due au retrait plastique mais elles influencent faiblement la fissuration due au retrait de séchage [Mindess, 1991].

Quelques résultats obtenus montrent que l'ajout de fibres polypropylène dans le béton projeté par voie sèche qui contient un ciment Portland ordinaire avec fumée de silice ne modifiait pas de beaucoup ses propriétés. Ces quelques modifications étaient probablement dues à des variations lors de la projection.

1.1.6.6 Eau

L'eau étant rajoutée à la lance de projection, elle n'est prise en compte qu'en fonction du mode de fabrication du mélange.

L'eau ajoutée à la lance, doit avoir les mêmes qualités que l'eau de gâchage d'un béton coulé. Elle doit être conforme à la norme NF EN 1008 « eau de gâchage pour béton ».

1.1.7 Formulation des bétons projetés

Une première méthode de formulation des bétons projetés, présentée par Gérôme (2003) se base sur quatre étapes :

- Préparation du mélange : cette étape peut être réalisée sur chantier, en centrale ou en usine, comme indiqué précédemment.
- Malaxage et homogénéisation en machine des matériaux à l'état sec ou humide.
- Transfert du mélange depuis la machine jusqu'à la lance.
- Projection du mélange sur le support à revêtir par air comprimé.

La projection peut être réalisée soit par voie sèche soit par voie humide, selon la nature des matériaux utilisés et la nature des travaux à effectuer.

Cependant, les résultats vont présenter quelques différences. En voie sèche, on obtiendra une résistance plus élevée qu'en voie humide, du fait du faible rapport E/C mais on aura une capacité de production plus limitée, un dégagement de poussière plus important, mais surtout un risque de détérioration d'un support fragile.

1.1.7.1 Passage dans la machine

Le passage du mélange dans la machine est directement lié à son écoulement dans le corps de l'engin. Pour qu'il soit correct, cela nécessite :

- Pour un mélange à projeter par voie sèche

Une granulométrie continue et adéquate du mélange sec, une faible teneur en éléments fins ($< 80 \mu\text{m}$) limitant les risques de colmatage (notamment au niveau de l'injection d'air comprimé) et une faible cohésion (teneur en eau de pré-humidification limitée).

- Pour un mélange à projeter par voie mouillée

Une consistance du mélange mouillé adaptée, suffisamment fluide (teneur en eau et emploi d'un adjuvant fluidifiant) pour se mouvoir facilement dans les pistons mais avec un minimum de cohésion interne pour limiter les risques de ségrégation (éléments fins et granulométrie du mélange).

A noter que la projection par voie sèche génère des poussières à la lance et à la machine. Ces poussières peuvent être réduites avec la préhumidification du mélange, le prémouillage ne permettant de réduire les poussières qu'à la lance et non à la machine.

Des solutions techniques permettent aussi de réduire les poussières ambiantes (système d'aspiration à la machine) par récupération des poussières émises.

1.1.7.2 Arrangement du béton sur le support

- Voie sèche

Les éléments arrivent de manière indépendante sur le support (dispersions des éléments dans le flux d'air dans la tuyauterie puis ségrégation des vitesses dans le cône de projection).

En début de projection le support, nu et rigide, génère un choc élastique (choc de deux particules solides avec transfert total de l'énergie). Les éléments de grande inertie rebondissent seuls, la pâte de ciment, les fines et l'eau adhèrent sur le support. Ces éléments fins hydratés s'incruster dans les pores (adhérence mécanique), puis recouvrent le support en formant un matelas de pâte de ciment. Lorsque ce matelas d'accueil est suffisamment épais, des granulats peuvent s'y incruster comme le montre Resse et Vénuat, 1981. L'incrustation des granulats dépend de la taille et de la vitesse des granulats, de la consistance du matelas récepteur fonction de la plasticité, de la viscosité et des granulats déjà en place [Jolin et al., 2001]. Ainsi en début de projection, seuls les sables peuvent s'incruster dans le matelas déjà en place puis ce sont tous les granulats.

Les éléments qui ne peuvent s'incruster dans le matelas de béton rebondissent en compactant le béton (transmission d'une partie de leur énergie cinétique). Ils participent ainsi à la constitution de la couche de béton.

Avec un mélange de répartition granulaire homogène, on augmente la probabilité que le grain qui arrive sur le support trouve l'espace suffisant pour s'incruster, d'où l'intérêt d'une granulométrie continue.

Les pertes par rebond sont généralement constituées de graviers (et de fibres dans le cas des bétons fibrés). Une partie des éléments n'atteint pas le support (perte de vitesse importante) et tombe au sol : ce sont les retombées, elles sont comptabilisées dans les pertes.

Les pertes sont inévitables lors de la projection mais peuvent être limitées grâce à :

- Une teneur en éléments fins suffisante pour permettre la formation rapide de la couche d'accueil.
- Une granulométrie continue qui favorise l'arrangement des grains sur le support.
- Des granulats de diamètre maximal limité.
- Une parfaite maîtrise de la tenue de la lance.

Il est dangereux en termes de qualité du béton en place de s'attacher à limiter absolument les pertes.

- Voie mouillée

L'aspect du mélange en sortie de lance est un ensemble de petites masselottes de béton (constituées d'une mince couche de pâte de ciment entourant un granulats) de consistance plastique véhiculées par un flux d'air comprimé [Resse et Vénuat, 1981]. Ces éléments s'empilent sur le support pour former la couche de béton.

La force de projection n'est pas aussi importante qu'en voie sèche mais suffit à compacter et à assurer la tenue au support de l'ensemble de la couche.

L'ajout de raidisseur à la lance permet de figer quasi-instantanément le béton sur le support. Cette rigidité artificielle n'est que superficielle mais permet d'éviter l'affaissement du béton. Ces produits ne modifient pas le temps de prise. L'emploi d'un raidisseur n'est pas forcément nécessaire [Beaupré, 1994].

Cette technique génère moins de pertes que la projection par voie sèche et la courbe granulométrique des bétons en place sur le support est proche de celle des mélanges avant projection.

En voie mouillée, les pertes ne peuvent être limitées que par la maîtrise de l'art de la projection.

Les granulats de grande taille, supérieure à 20 mm, ont une trop grande inertie et peuvent rebondir quasi systématiquement [Resse et Vénuat, 1981].

1.1.8 Propriétés des bétons projetés

Il est connu que les bétons projetés et ordinaires ont plusieurs spécificités communes néanmoins, les bétons projetés ont d'autres spécificités propres à eux.

1.1.8.1 A l'état frais

- Pertes par rebond

Le rebond est la fraction des matériaux projetés qui ricochent le support. Puisqu'il représente une perte économique importante (notamment en voie sèche), de nombreuses études portent sur le sujet. La plupart des chercheurs effectuent leurs recherches en utilisant le procédé de projection par voie sèche car le procédé de projection par voie humide donne des pertes faibles par rebond. Certains chercheurs rapportent des valeurs de rebond variant entre 15% et 50% en voie sèche tandis qu'en voie mouillée, les valeurs de rebonds varient entre 5% et 10%. Dans une étude récente sur le béton projeté par voie humide, Burns (2008) rapporte des valeurs de rebond supérieures ou près de 15%. Il explique ce taux plus élevé par la différence d'échelle entre son étude et les valeurs avancées par l'industrie. Burns (2008) démontre que les

perles par rebond sont plus importantes lors de la projection des 25 premiers millimètres sur le support puis elles diminuent considérablement. Le pourcentage de rebond total obtenu sera donc influencé par l'épaisseur de la couche projetée.

- Pertes en matériaux

Les valeurs des pertes courantes et acceptables, pour une épaisseur projetée d'environ 10 cm, sont au maximum limitées à 30% pour la voie sèche ; et 5 à 15% pour la voie humide

- Granulométrie des pertes et des bétons

Les analyses de la granulométrie confirment que la projection par voie sèche modifie la composition après projection (Figure 1.3) mais elle reste la même dans la projection par voie mouillée (Figure 1.4).

Dans la projection par voie sèche, les bétons après projection sont fortement plus dosés en éléments fins et les pertes sont plus fortement dosées en gravillons qu'en éléments fins.

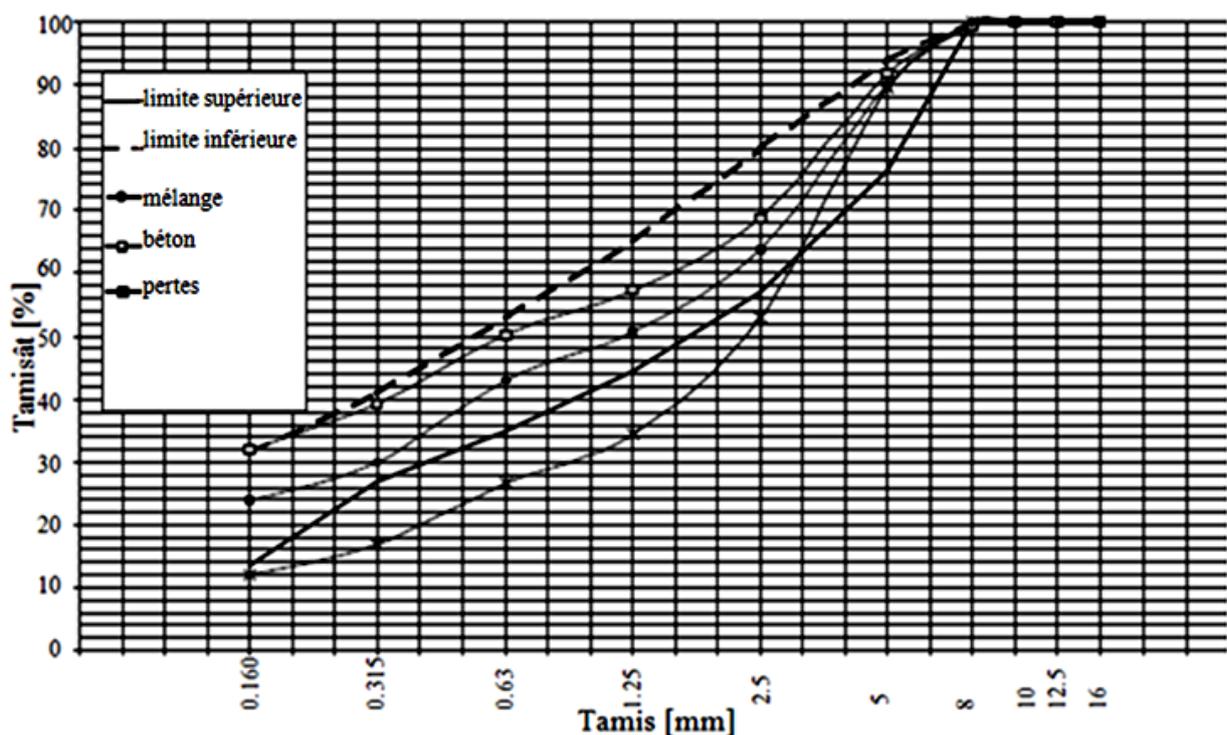


Figure 1.3 Courbes granulométriques d'un mélange réel projeté par voie sèche, du béton correspondant et des Pertes (Gérôme, 2003).

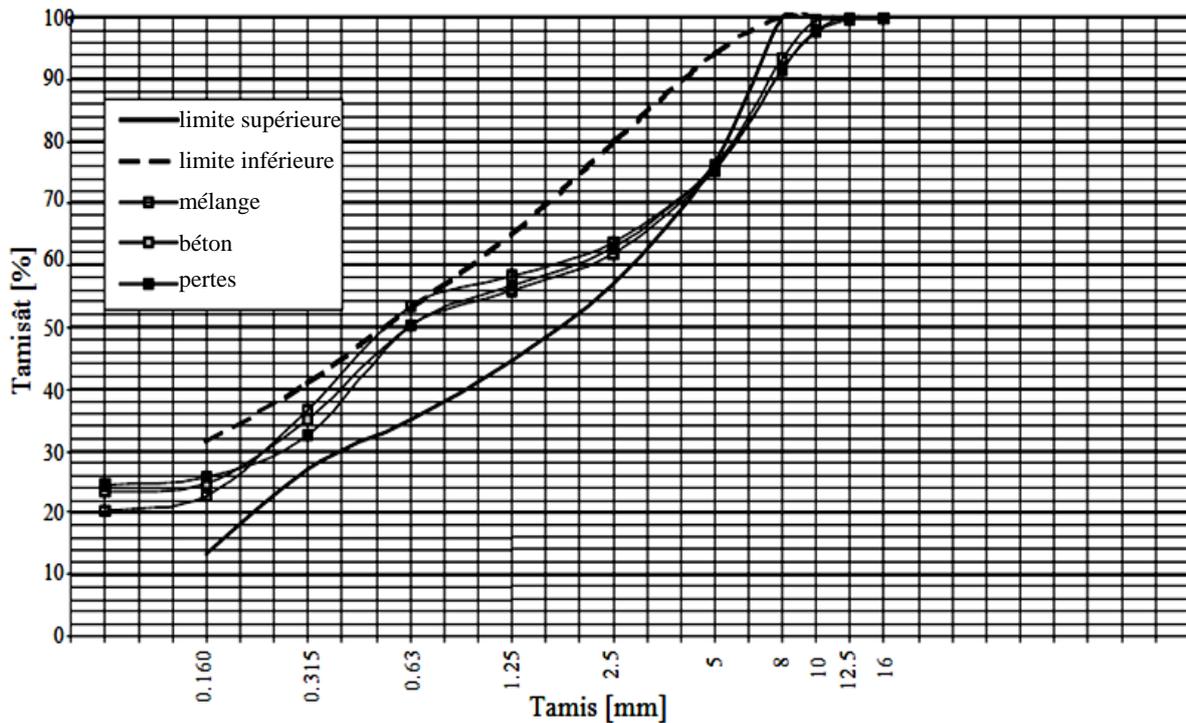


Figure 1.4 Courbes granulométriques d'un mélange réel projeté par voie mouillée et du béton correspondant (Gérôme, 2003).

- Pertes en fibres

Voie sèche

Les essais expérimentaux effectués par Gérôme (2003) ont donné des valeurs de l'ordre de 50 à 80%, ce qui correspond à 10 et 24 kg/m³ de fibres. Les pertes dépendent des dimensions des fibres.

Ces valeurs sont très élevées comparativement à ce qui est couramment admis et estimé sur chantier : 50% est un maximum, mais la méthode de mesure peut être différente et minimiser les pertes en fibres. En général, on exige au moins 15 à 20 kg/m³.

Voie mouillée

Les pertes en fibres mesurées par Gérôme (2003) lors de projection de béton par voie mouillée varient de 5 à 49%, ce qui correspond à une teneur en fibres en place variant de 15,2 à 28,7 kg/m³ selon la dimension des fibres pour un dosage initial de 30 kg/m³. Il est couramment exigé un dosage en place minimum de 15 kg/m³.

- Teneur en eau des bétons projetés par voie sèche

La teneur en eau en place des bétons projetés par voie sèche est de l'ordre de 8,7% du poids de béton sec, soit 190 litres d'eau par m³ de béton (poids du béton sec pris en compte : 2,2 t/m³).

- Poussières (cas de projection par voie sèche)

Comme indiqué précédemment, lors de la projection par voie sèche, le mélange initial est constitué seulement de ciment et de granulats puis le contact entre ce mélange et l'eau se fera à la lance, ce qui provoque des quantités importantes de poussières.

Afin de réduire l'impact négatif de ces poussières, une préhumidification du mélange est recommandée. La préhumidification consiste à ajouter une faible quantité d'eau au mélange sec (environ 3 % de son poids). Cette opération permet de supprimer l'émission de poussière au chargement de la machine.

- Epaisseur projetable maximale (voie mouillée)

Les tests réalisés par Gérôme (2003) montrent que l'on peut projeter des couches de béton de plus de 10 cm d'épaisseur en plafond avec du Sika 40 AF dosé à 10%. L'emploi de Sika 53 AF dosé à 6% élève cette valeur à 14 cm. Une valeur de 20 cm a été atteinte avec un mélange contenant des fibres dosées à 60 kg/m³.

Ces résultats ne permettent pas de mettre en évidence les critères de formulation influant sur la tenue du béton sur le support.

1.1.8.2 A l'état durci

- Résistance en compression

L'essai le plus courant est la mesure de la résistance en compression (NF P 18-406) du béton à l'âge de 28 jours [Gérôme, 2003]. Cette mesure a été réalisée sur tous les bétons testés.

Pour certaines compositions, elle a été complétée par des mesures à d'autres échéances, pour un total de 5 mesures de 1 à 365 jours.

- Voie sèche

Afin d'étudier la résistance en compression des bétons projetés par voie sèche, 23 bétons ont été testés par Gérôme (2003). Les résultats obtenus ont donné des valeurs de l'ordre de 53 à 82,40 MPa avec une moyenne de 67,30 MPa. Les moyennes ont été calculées sur la base de 3 à 12 essais et les dispersions sur les valeurs peuvent être importantes jusqu'à 20%.

- Voie mouillée

12 bétons projetés par voie mouillée ont été testés à l'âge de 28 jours par Gérôme (2003). Les résultats de ses tests ont donné des valeurs variant de 35,6 à 46,9 MPa, soit une moyenne de 41,30 MPa. Cette valeur est supérieure aux exigences courantes. Les dispersions sur les résultats sont faibles (inférieures à 10%).

- Retrait

Le retrait et le fluage réalisés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 110 mm et de longueur 240 mm (élancement légèrement supérieur à 2).

Les travaux réalisés par Gérôme (2003) montrent que les déformations mesurées au bout d'un an restent faibles :

--Pour la voie sèche, ces valeurs sont de l'ordre de 0,009 à 0,013 mm/m (Figure 1.5).

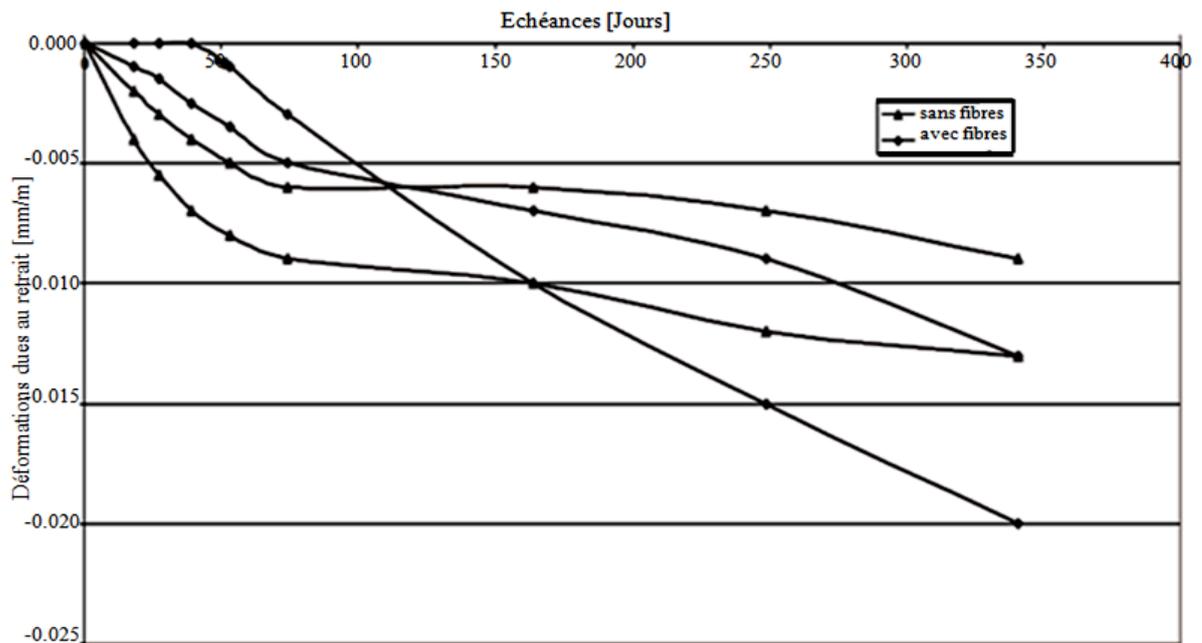


Figure 1.5 Evolution du retrait endogène dans le temps des bétons projetés par voie sèche.

Ces valeurs sont faibles mais correspondent aux valeurs traditionnellement mentionnées pour les bétons courants [Féron, 2002 ; Chanvillard, 1999].

--Pour la voie mouillée, ces valeurs sont dans la plage de 0,030 à 0,033 mm/m (Figure 1.6).

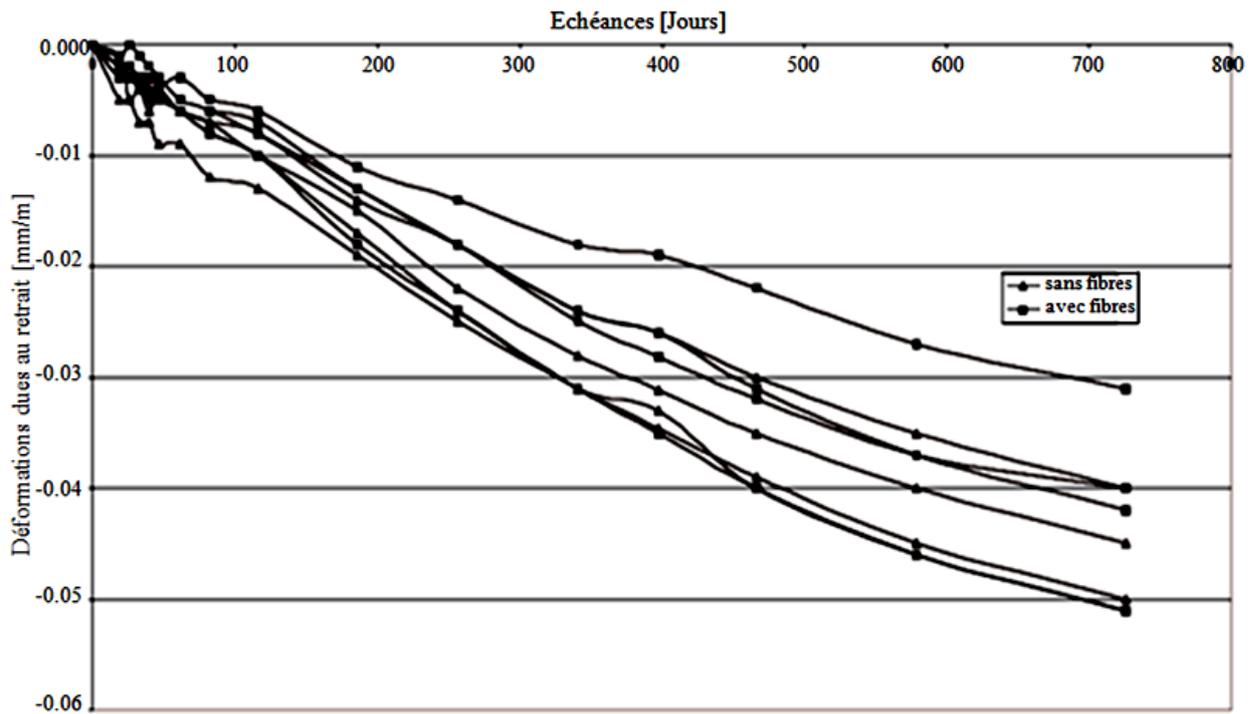


Figure 1.6 Evolution du retrait endogène dans le temps des bétons projetés par voie mouillée.

La valeur du retrait est pratiquement 3 fois plus faible pour la voie sèche.

- Fluage

Les essais effectués par Gérôme (2003), pour les deux techniques de projection, ont été faits sur des éprouvettes non soumises à la dessiccation. Les résultats obtenus dans le cas de la voie sèche sont proches à ceux obtenus pour la voie humide (Figures 1.7 et 1.8). Ces résultats sont inférieurs à ceux des bétons coulés.

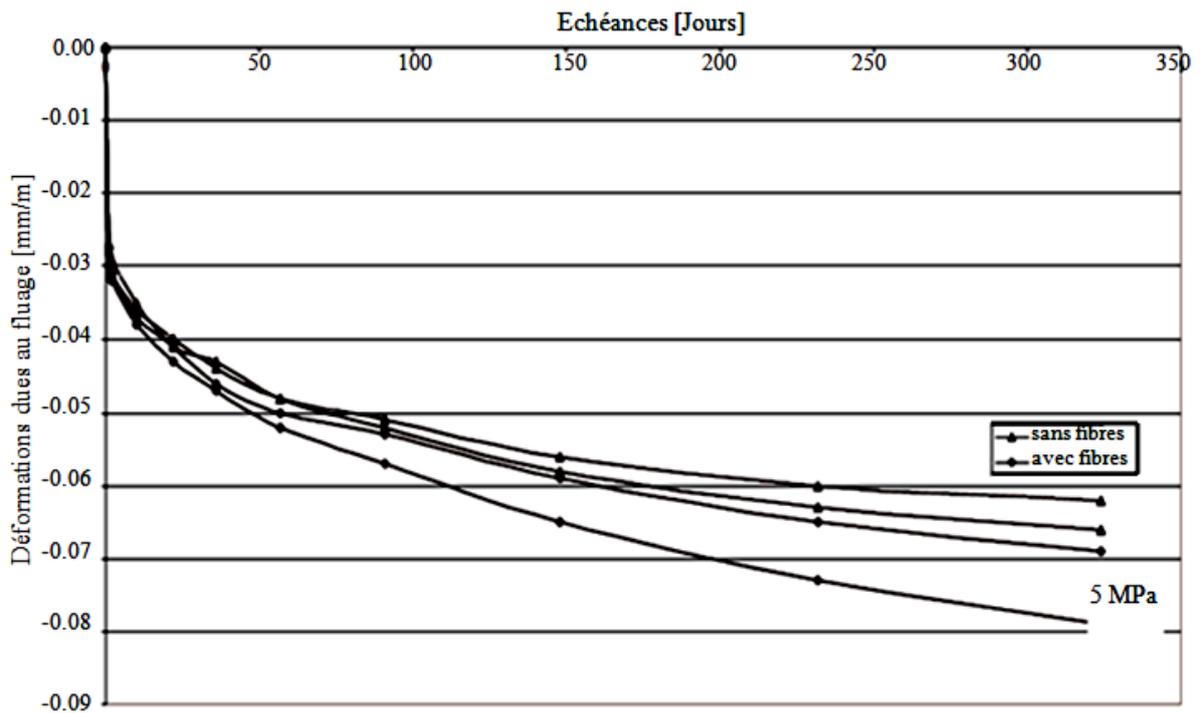


Figure 1.7 Evolution du fluage dans le temps des bétons projetés par voie sèche.

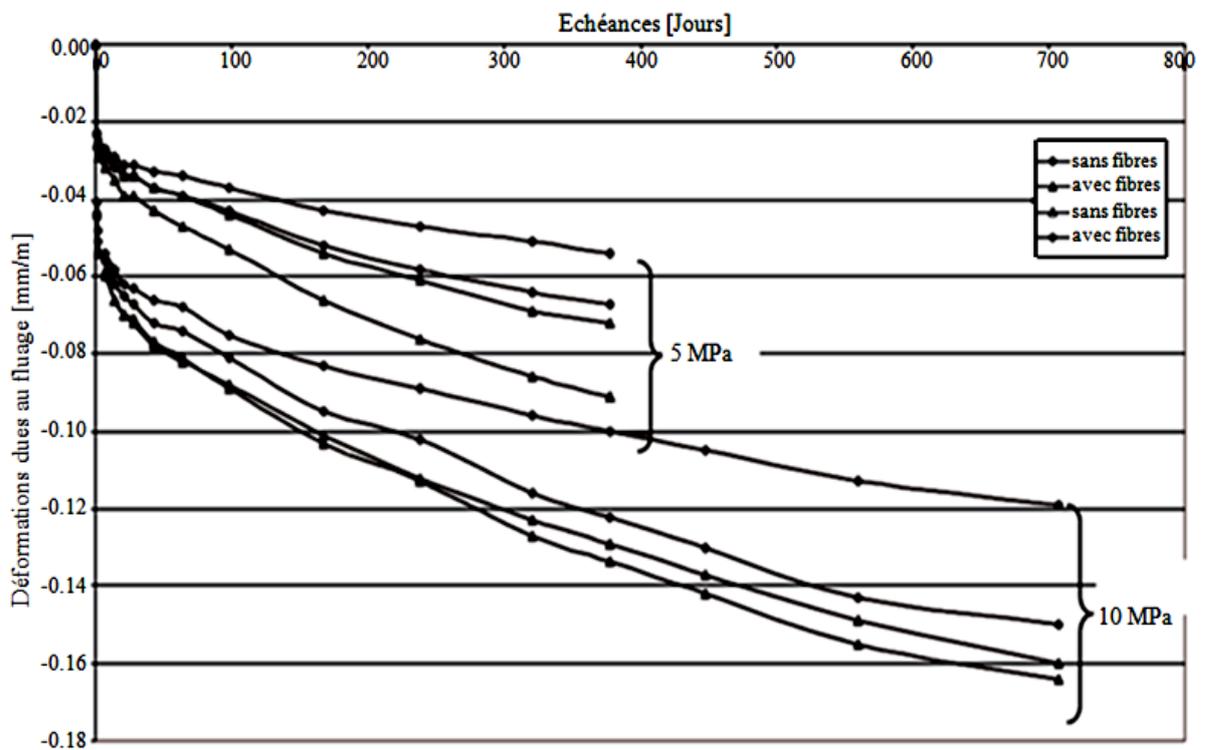


Figure 1.8 Evolution du fluage dans le temps des bétons projetés par voie mouillée.

1.2 Bétons de sable

1.2.1 Définition

Le béton de sable est un matériau composé de ciment, sable, fillers, eau et adjuvant réducteur d'eau. Des gravillons peuvent être ajoutés à raison de G/S (Gravillon/Sable) $\leq 0,7$.

L'amélioration du comportement du matériau peut nécessiter parfois l'ajout de fines et de fibres.

Les dosages en ciment et eau permettent de le distinguer des mortiers.

1.2.2 Historique

Le matériau trouve son origine dans le « béton aggloméré » mis au point par F. Coignet vers la fin du 19^{ème} siècle. Ce mélange était constitué de ciment, chaux, sable et eau. On retrouve cette technique dans l'édification de la tour de Port Saïd en Egypte [52 mètres]. Cependant, le pays où il a été le plus utilisé est incontestablement l'ex URSS. On le retrouve, sous sa formulation moderne, dans la construction du Port de Kaliningrad et du port CHERNAVSKIF à Voroney.

Après la fin du second conflit mondial, le professeur Rebinder reprit les travaux scientifiques, ce qui a rendu possible la construction de nombreux aérodromes. Le développement de ce béton a autorisé son utilisation à grande échelle jusqu'à des volumes de 1 million de m³ par an.

La pénurie de gros granulats et la disponibilité de grands gisements de sable, notamment dans le sud-ouest Français, autorisèrent l'usage de ce matériau. A cet effet, l'association SABLOCRETE a vu le jour en 1988 en France pour coordonner les travaux de recherche sur ce matériau.

1.2.3 Domaines d'utilisation

Les bétons de sable peuvent être utilisés dans divers domaines tels que le bâtiment, les routes, les bétons vibrés et la projection.

1.2.4 Formulation d'un béton de sable

La formulation d'un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques puis à combler la porosité de cet empilement avec la pâte de ciment. Cette pâte elle-même étant caractérisée par le rapport E/C pour viser une maniabilité à court terme et une résistance et durabilité à long terme. Le problème de la formulation d'un béton se pose principalement en

termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité définie comme le rapport du volume solide sur le volume total, correspond au complément à l'unité de la porosité. Les méthodes classiquement utilisées sont celles des bétons ordinaires avec des adaptations compte tenu de la grande quantité de fines utilisée.

1.2.5 Caractéristiques des bétons de sable

1.2.5.1 Granulométrie/maniabilité

Les bétons de sable nécessitent un volume de mouillage important par rapport aux bétons ordinaires et donc, un rapport E/C plus élevé (supérieur à 0,5) que l'on peut réduire en ajoutant des additions en fines, des fluidifiants et des superplastifiants.

A noter que la quantité d'eau dépend aussi de la granulométrie du sable : plus ce dernier contient beaucoup d'éléments grossiers, plus la maniabilité augmente. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité [Casanova, 1996].

1.2.5.2 Retrait et fluage

Les essais de retrait et fluage ont été réalisés sur un béton de sable et un béton classique, afin de les comparer [Benaïssa, 1992].

- Retrait

Les essais effectués par Benaïssa (1992) sur le béton de sable en comparaison avec le béton ordinaire ont mené aux résultats représentés sur les figures 1.9 et 1.10.

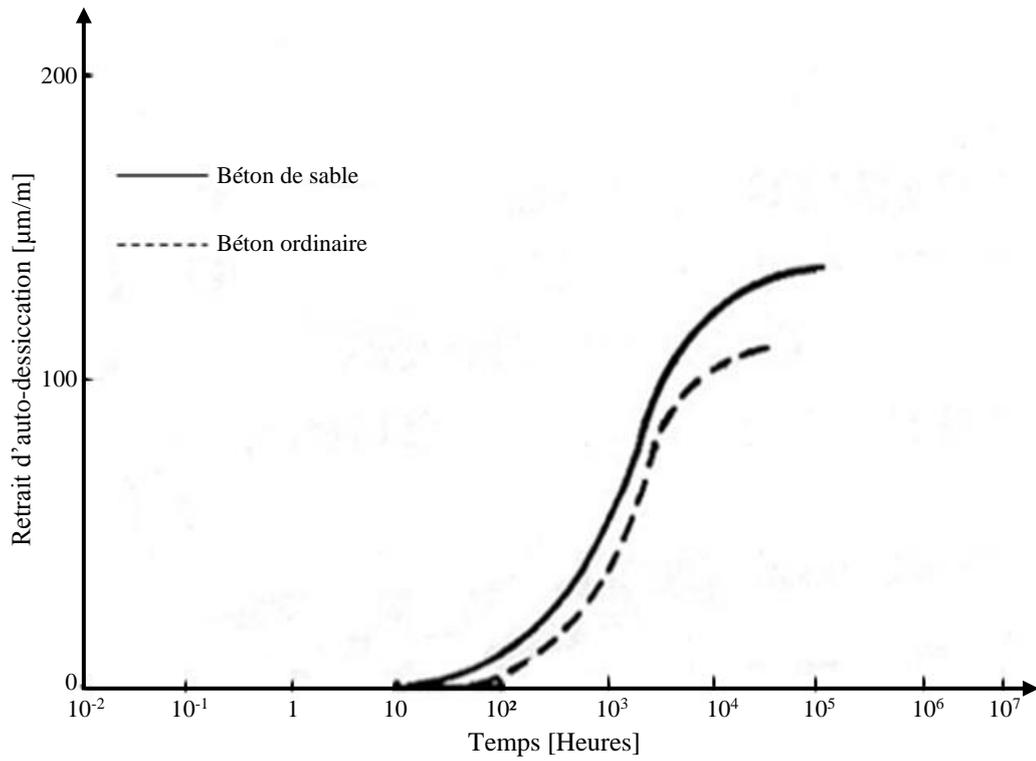


Figure 1.9 Retrait d'auto-dessiccation.

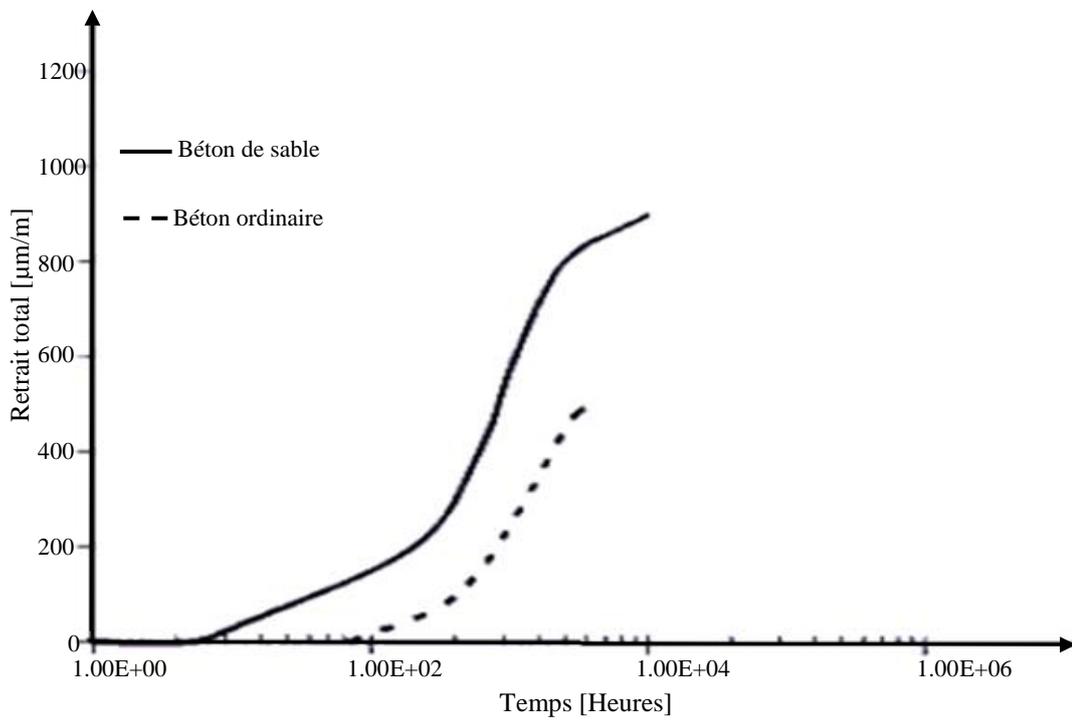


Figure 1.10 Retrait total.

Les résultats représentés sur la figure 1.12 ont été obtenus en isolant le matériau de l'extérieur (milieu étanche), et ceux de la figure 1.13, en laissant le matériau sécher (milieu non étanche).

D'après les courbes des deux figures, on constate que lorsqu'on isole le matériau, le retrait d'auto-dessiccation du béton de sable est proche de celui du béton ordinaire tandis que dans le 2^{ème} cas, le retrait du béton de sable est deux fois plus important que celui du béton ordinaire.

- Fluage

Le fluage est une déformation qui résulte de l'effet d'une contrainte constante appliquée au béton.

Afin d'atténuer ce phénomène, il est conseillé de réduire le dosage en ciment en ajoutant des granulats [Akchiche, 2007].

Les essais de fluage effectués sur le fluage ont concerné les bétons de sable et les bétons ordinaires afin de les comparer. La figure 1.11 montre que la valeur du fluage du béton de sable est plus importante que celle du béton classique. Ceci est lié aux paramètres rentrant dans la composition des deux matériaux et qui influent systématiquement sur les déformations et donc sur les résistances [Benaissa, 1992].

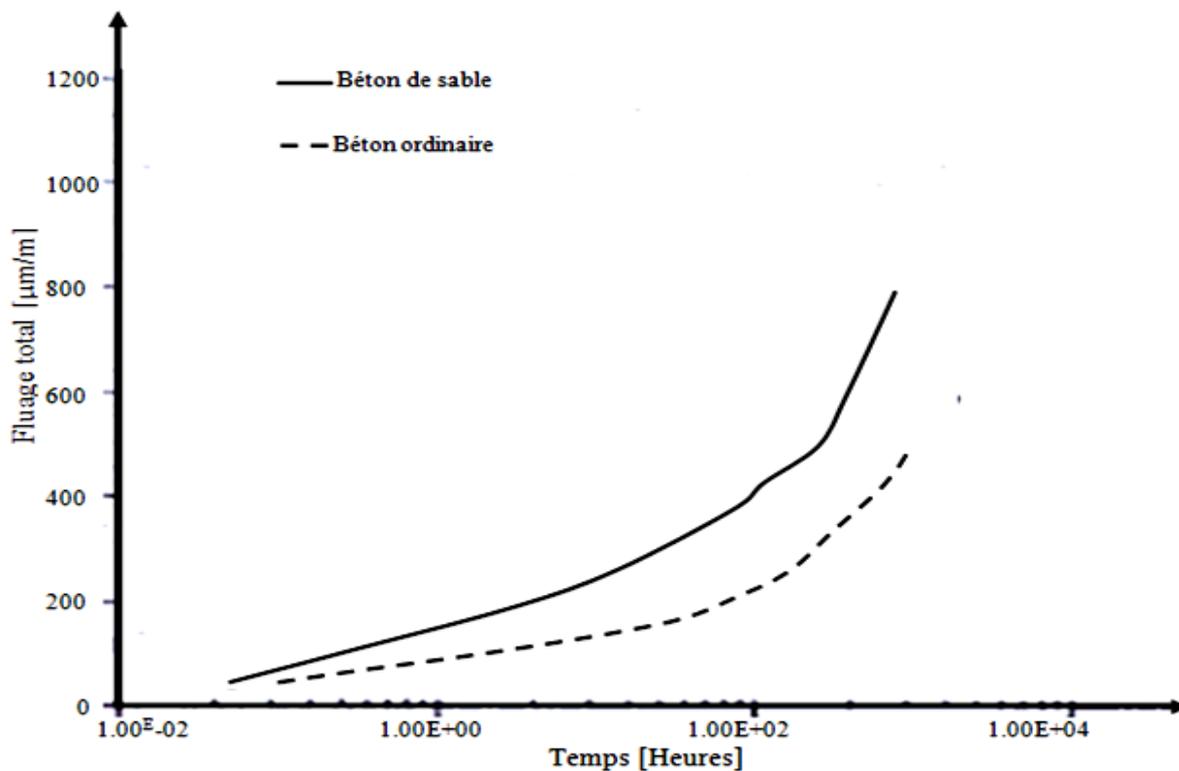


Figure 1.11 Fluage total.

1.2.6 Durabilité des bétons de sable

La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend évidemment de l'environnement de celui-ci. L'estimation de la durabilité se fera par conséquent à l'aide d'essais de perméabilité à l'eau et à l'air, de mesure de la carbonatation et de la pénétration des ions chlorures. Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico chimiques [Sablocrete, 1994].

- La perméabilité à l'eau est plus faible qu'un béton ordinaire ($2,5 \cdot 10^{-12}$ contre 10^{-10} m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés.

- La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores ($< 10\mu\text{m}$) et de l'absorption initiale.

Des résultats expérimentaux montrent une quasi proportionnalité entre profondeur carbonatée et absorption initiale [Balayssac, 1993].

- Le comportement à la pénétration des ions chlorures est comparable à celui des bétons traditionnels.

1.3 Panneau 3D

1.3.1 Historique

L'origine du panneau 3D remonte au début des années 60 où un nouveau système de construction utilisant des éléments modulaires tridimensionnels fabriqués avec du fil a été proposé aux USA. Ces éléments en fils doivent être remplis en matière synthétique après leur fabrication. Cependant, un tel système était compliqué et lent à mettre en œuvre. De là est né le panneau 3D réalisé par la société EVG-Graz (1998).

En Algérie, cette technique remonte à environ un quart de siècle et fut en premier utilisée par la société d'état BATIRAPID. Cependant, l'usage de cette technique reste tout à fait marginal

1.3.2 Description du système

Le système se compose de deux treillis soudés reliés par des fils d'acier de liaison inclinés et soudés en diagonales. Entre les deux treillis soudés, est intercalée une feuille de polystyrène d'épaisseur variable. Il en résulte un panneau tridimensionnel (3D) léger, isolant et de haute rigidité (Figure 1.12).



Figure 1.12a Vue en plan du panneau 3D.



Figure 1.12b Vue transversale du panneau 3D.

Figure 1.12 Panneau 3D.

Il est possible de remplacer la feuille de polystyrène par un noyau de polyuréthane, laine de roche ou tout autre matériau léger et isolant.

Sur les deux faces, est projeté du béton d'épaisseur variable en fonction de la rigidité désirée.

Les deux couches de béton projeté agissent comme une section du béton armé composé.

Par ailleurs, les dimensions des mailles du treillis soudé ainsi que le diamètre des fils peuvent aussi être variés en fonction des sollicitations. La mise en place du béton se fait généralement par voie sèche. Cette structure autoportante et rigide permet des montages de structures légères et rapides. Les dimensions des panneaux fabriqués et utilisés en Algérie sont de 3,00 m de long, 1 m de large et 10 cm d'épaisseur. Les fils du treillis soudé ont un diamètre de 3 mm, et le poids est de 20 kg.

1.3.3 Avantages du procédé EVG

Les panneaux sont produits de façon industrialisée ; c'est-à-dire qu'à la sortie de l'usine, les panneaux sont prêts à l'emploi et il ne reste que la pose, le montage de la structure et la projection du béton sur les deux faces.

Le choix, en Algérie, s'est porté sur l'usage de polystyrène comme noyau isolant, en raison du rapport qualité/prix ou plus spécifiquement du rapport performance d'isolation thermique/prix. Cependant, il est tout à fait possible d'envisager d'autres matériaux au lieu et place du polystyrène à l'instar de polyuréthane.

L'autre avantage du polystyrène, c'est son comportement élastique aux chocs dus à la projection, ce qui réduit considérablement les pertes par rebond.

L'autre intérêt du panneau 3D est qu'en positionnement des cales, on peut projeter des couches de béton d'épaisseur équivalente et par conséquent, on assure un comportement statique à cet élément de structure.

Ces avantages viennent s'ajouter à la rapidité d'exécution des structures, un impact environnemental certain dû à l'isolation thermique que procure le panneau 3D ; et enfin une facilité de manipulation entraînant une réduction du nombre d'ouvriers et l'économie de l'usage de grues.

1.3.4 Domaines d'utilisation

Au vu des avantages précédemment décrits qu'offre le panneau 3D, ce système est tout à fait recommandé dans le montage de structure en RDC et RDC + 1 dans le cadre des programmes d'habitations individuelles, rurales, écoles et base de vie des ensembles industriels.

L'avantage de ce procédé est la rapidité d'exécution et son comportement vis-à-vis du séisme en raison de sa légèreté.

1.3.5 Panneau 3D en Algérie

La société TPL créée en 1983 et spécialisée dans les produits longs est issue de l'ex SNS (Société Nationale de Sidérurgie). TPL a par la suite créé la filiale SOTREFIT (Société de Tréfilage de Tiaret) spécialisée dans la production de panneau 3D, afin de répondre au besoin pressant en matière de logements. La capacité de production de SOTREFIT est de 200 000 panneaux/an, soit l'équivalent de 2000 logements. Elle a fourni les quantités nécessaires pour la réalisation des chalets de Boumerdes, après le séisme de 2013 ; les bases de vie de SONATRACH à Hassi R'mel et Kenanda.(W : Relizane), le marché couvert de Blida, des villas à Saïda, Blida et Laghouat et des logements à Bir Touta. Ce n'est là que quelques

exemples, nonobstant d'autres réalisations de moindre importance notamment dans le domaine de l'habitat individuel et semi collective. Les produits sont certifiés ISO9001 et ISO 14001.

Par ailleurs, des institutions publiques telles que CTC (Contrôle Technique de Constructions) et le CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiment) ont aussi certifié le produit.

Cependant, son développement reste assez timide et demeure tributaire d'un changement de mentalité dans le domaine du bâtiment.

Conclusion

A la lecture du contenu de ce chapitre, il apparait effectivement que des travaux sur bétons de sable vibré sont rares ; et encore plus rares en matière de bétons de sable projetés.

Par railleurs, l'usage de ce matériau dans la conception de panneaux 3D a été peu appréhendé. Des publications à caractère scientifique traitant du sujet abordé dans cette thèse restent peu nombreuses. Pour toutes ces raisons, nous avons jugé bon de présenter les bétons projetés par voies sèche et humide et le panneau 3D. Le peu d'études sur ce matériau, comme précédemment souligné, a pénalisé quelque part les conclusions présentées en raison du manque de résultats pouvant servir de référence.

La littérature montre que mener des essais expérimentaux sur le béton projeté revient extrêmement cher. En effet, dans cette technique, l'essentiel des tests expérimentaux se mènent en chantier avec des équipements lourds, telles que les machines de projection (pompes, guniteuses). Le problème en matière de projection, c'est aussi le nombre élevé de facteurs affectant la qualité du matériau qui rend plus complexe toute étude qui se veut exemplaire. La même formulation d'un mélange à projeter peut changer de comportement selon les données climatiques, à l'instar de la température, l'humidité et le vent. La qualité du matériau projeté en place sur le support est aussi subordonnée à l'interaction entre le béton et la nature du support (rigide ou souple). Nonobstant ces facteurs, il y a lieu de signaler l'impact de la tenue de la lance (horizontale ou inclinée), de la distance de celle-ci par rapport au substrat, de la vitesse de projection. Cependant la rhéologie reste déterminante sur la qualité du béton car elle conditionne la pompabilité, la projectabilité et le taux de matériaux perdu par rebond, et par conséquent le coût du mélange.

Le comportement à long terme du matériau nécessite aussi d'aborder l'étude de différents facteurs de durabilité telle que la résistance aux acides, sulfate, ions chlore, carbonatation, etc.

Comme on le voit, les paramètres d'étude qui restent à explorer sont très nombreux mais aussi complexes, au vu des interactions existant entre eux. Cependant, la réponse à ces questions est cruciale dans les recherches futures pour avoir une meilleure approche des performances à l'état frais et durci du béton projeté dont le béton de sable.

CHAPITRE 2

**MATERIAUX, METHODES ET
FORMULATION DES BETONS ETUDIES**

CHAPITRE 2

MATERIAUX, METHODES ET FORMULATION DES BETONS ETUDIES

Introduction

Le béton projeté n'est pas un matériau qui peut faire l'objet d'étude uniquement en laboratoire. L'approche des caractéristiques de ce matériau à l'état frais ne peut se faire, pour l'essentiel, qu'à la base d'essais menés en chantier. La logistique est très lourde et donc très coûteuse.

Les expérimentations menées en laboratoire et sur site ont permis de caractériser le matériau en projection par voies sèche et humide sur des panneaux tridimensionnels, à l'état frais et durci.

Des essais de caractérisation à l'état frais ; avant, pendant et après projection ont été donc menés ; et l'étude a été complétée par la détermination des caractéristiques à l'état durci d'une part et l'évolution du comportement différé d'autre part.

L'étude du béton de sable fibré et projeté, objet de la présente thèse, a fait l'objet d'une analyse comparative avec le béton habituellement utilisé dans la conception des panneaux 3D et projeté par voie sèche.

Dans ce contexte, nous proposons une méthodologie de formulation du béton de sable projeté basée sur la méthode de Caquot, elle-même basée sur le principe de l'optimisation de la compacité du mélange granulaire tout en intégrant l'aptitude du mélange au pompage et à la projection. A noter que dans la technique du béton projeté, il n'y a pas de méthodes de formulation théoriques ou expérimentales convenues, à l'instar des autres gammes de béton. Cependant, la composition recherchée doit tenir compte des exigences requises pour la qualité du matériau pour ce processus de mise en place, notamment l'adhérence, l'épaisseur des couches projetées, la résistance et le volume de rebond.

L'analyse comparative de cette formulation avec le béton ordinaire projeté par voie sèche a concerné l'état frais (avant, pendant et après projection) et l'état durci. En outre, le suivi du comportement du retrait du béton de sable projeté a fait l'objet d'une comparaison non seulement avec le béton ordinaire à base de gravillon 3/8 projeté par voie sèche ; mais aussi avec un béton vibré de même classe de résistance (25/35 MPa).

Les matériaux utilisés dans la composition des bétons d'étude sont ceux servant à la formulation des autres gammes de béton. Cependant, les dosages de ces ingrédients sont adaptés à la technique de mise en place.

2.1 Matériaux

2.1.1 Ciment

Le ciment est de type CEM II 42.5, contenant 15% de fines calcaires, sa surface Blaine est de 3950 cm²/g et sa densité est de 3,1 g/cm³. Les caractéristiques chimiques sont représentées par le tableau 2.1. Quant à la granulométrie, elle est illustrée par la figure 2.1.

2.1.2 Fillers calcaires

Les fillers calcaires ont une surface Blaine de 3200 cm²/g et une densité de 2.66 g/cm³. Les caractéristiques chimiques et la répartition granulométrique sont représentées par, respectivement, le tableau 2.1 et la figure 2.1.

Tableau 2.1. Caractéristiques chimiques du ciment et des fillers calcaires.

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Perte au feu
Ciment [%]	63,8	21,90	6,60	3,90	0,02	0,85	1,5	-
Fillers calcaires [%]	45,4	1,5	7,19	0,5	0,4	1,37	3,25	36,80

2.1.3 Sable

Le sable est de classe 0/5 mm ; ses propriétés physiques sont représentées dans le tableau 2.2. La distribution granulométrique est illustrée par la figure 2.1. Elle a été réalisée par tamisage selon la norme NFP 18-560.

Tableau 2.2. Propriétés physiques du sable.

Nature	Masse volumique apparente [t/m ³]	Masse volumique absolue [t/m ³]	Densité spécifique [g/cm ³]	Pourcentage de fines [%]	Equivalent de sable	Module de finesse
Calcaire	1,4	2,61	2,6	1,4	95,5	2,2

2.1.4 Gravillons

Les gravillons sont de type anguleux, de nature calcaire et d'étendue granulaire 3/8 mm et 8/15 mm. La courbe granulométrique est représentée par la figure 2.1.

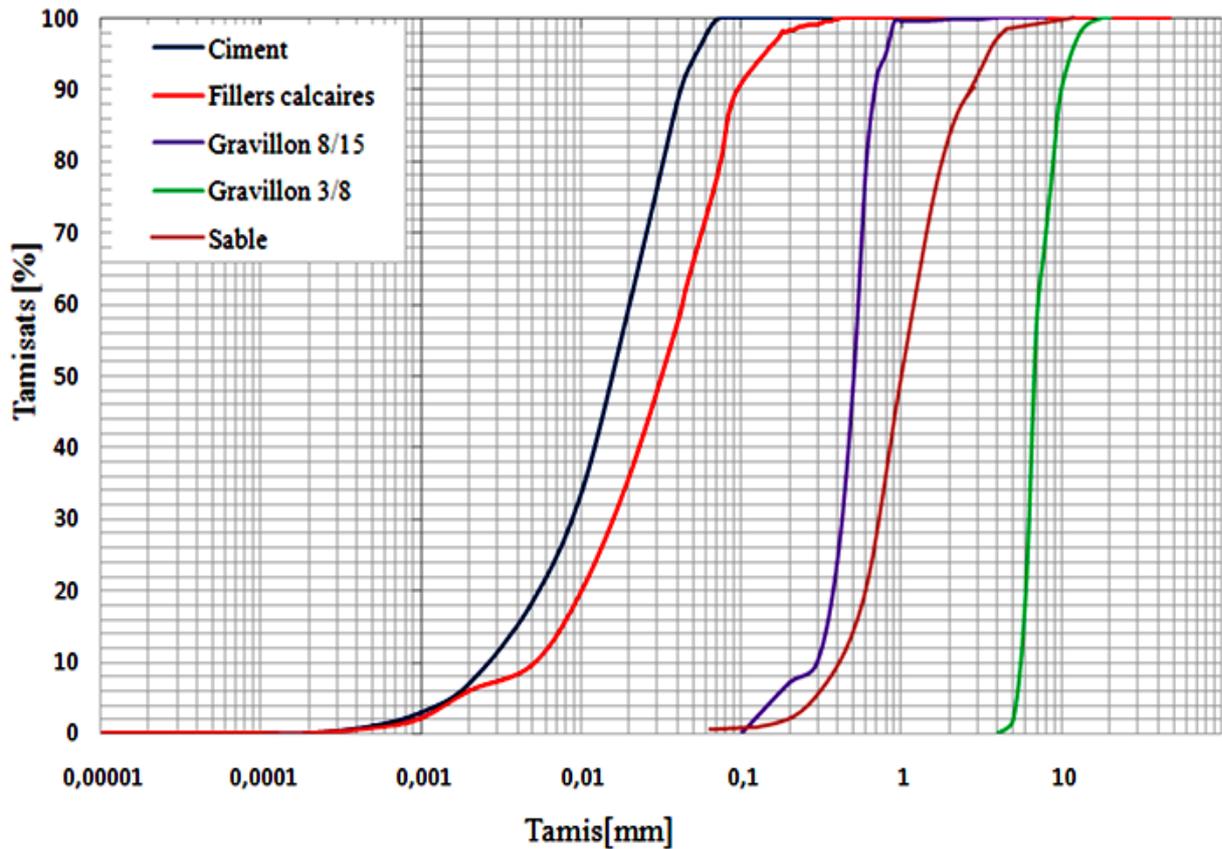


Figure 2.1. Courbe granulométrique des agrégats.

2.1.5 Adjuvants

L'adjuvant est un superplastifiant réducteur d'eau de type Medafluid. Sa densité est de 1.13, sa teneur en ions chlorure est inférieure à 1g/l et son PH est de 6.7 ± 1 .

2.1.6 Fibres métalliques

Les fibres métalliques utilisées sont de type DRAMIX-BEKAERT. Ce sont des fibres à haute teneur en carbone, fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé et dotées de crochets aux extrémités. Un amas de ces fibres, ainsi que leurs caractéristiques géométriques sont représentés par la figure 2.2 et le tableau 2.3, respectivement.

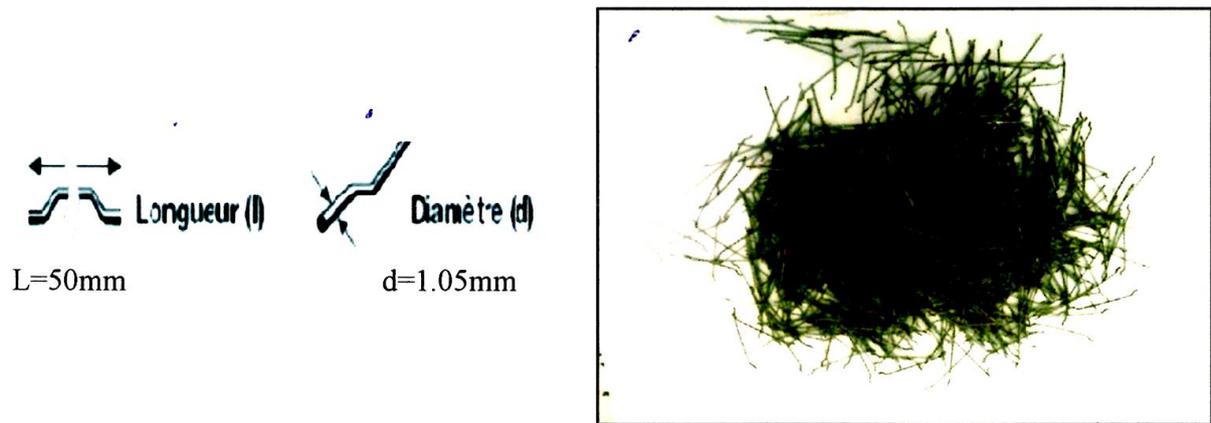


Figure 2.2. Fibres métalliques de type DRAMIX BEKAERT.

Tableau 2.3. Caractéristiques des fibres DRAMIX.

Longueur [mm]	50
Diamètre [mm]	1,05
Elancement ($\lambda = l/\sqrt{d}$)	48
Type de Matériau	Fil d'acier tréfilé
Module d'élasticité [MPa]	210000
Résistance à la traction [N/mm ²]	1000
Quantité de fibre/kg	2800

2.2 Procédures expérimentales

2.2.1 Essai d'étalement

Le béton, après avoir été placé dans un moule tronconique et démoulé, reçoit 15 secousses en 15 secondes (table à secousses), on mesure alors le diamètre de la galette ainsi obtenue (moyenne de deux diamètres mesurés le long de deux axes perpendiculaires). L'étalement en (%) est obtenu par la relation: $\varepsilon [\%] = 100 \times (D_f - D_i) / D_i$; avec D_f : diamètre final de la galette, D_i : diamètre initial de la galette, c'est-à-dire celui de la base du cône.

Le béton ayant servi à remplir le cône est récupéré par projection dans des caisses de dimensions 50 cm x 50 cm x 15 cm selon la norme NF P 95-102 qui se base sur les recommandations normalisées publiées par l'AFTES (1993). Ces caisses sont en contreplaqué et ajourées pour simuler la souplesse du polystyrène et les pertes par rebond.

2.2.2 Essai de compression

Les essais de compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 11 x 32 cm² selon la norme NF P18-406. Les éprouvettes ont été obtenues par projection du béton dans les moules. Une fois arasées les éprouvettes sont conservées à une température de 22°C ± 2°C et une humidité relative de 50% ± 5%. Le démoulage est effectué au bout de 24 heures et la conservation a été maintenue en conditions sèches. Les mesures ont été effectuées à 1, 2, 3, 7, 14 et 28 jours avec une presse de capacité maximale de 3000 KN et une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (Figure 2.3).



Figure 2.3 Presse de capacité 3000 KN.

2.2.3 Essai de traction

L'essai de traction par fendage (Figure 2.4) a été réalisé sur éprouvette 11 x 32 cm² (essai Brésilien) conformément à la norme française NF P18-408. Les éprouvettes ont été obtenues par projection du béton dans les moules. La conservation s'est faite en salle sèche comme pour la compression. Le démoulage a été effectué au bout de 24 heures, et les mesures ont été relevées à 1, 3, 7, 28, 90 et 180 jours.

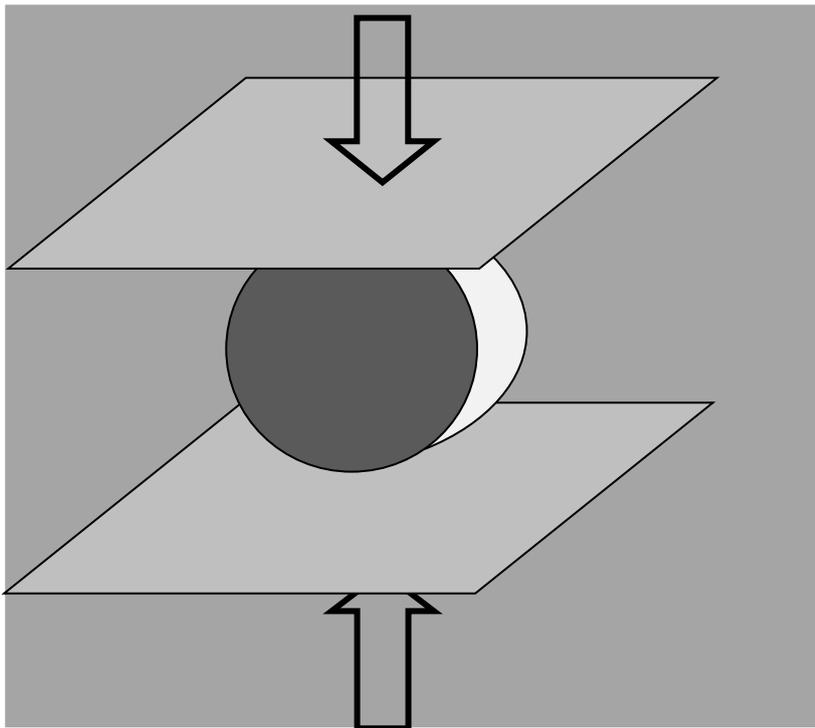


Figure 2.4 Essai de traction par fendage.

L'essai de fendage revient à appliquer une compression sur deux arêtes des carottes.

2.2.4 Modules d'élasticité

Le module d'élasticité est mesuré sur éprouvettes $16 \times 32 \text{ cm}^2$. L'appareil de mesure est constitué par deux couronnes métalliques distantes de 16,66 cm et fixées sur le corps de l'éprouvette au moyen de vis pointeau. Le raccourcissement est mesuré grâce à trois capteurs précis situés entre les couronnes (Figure 2.5). La mesure s'est faite à 28 jours d'âge.

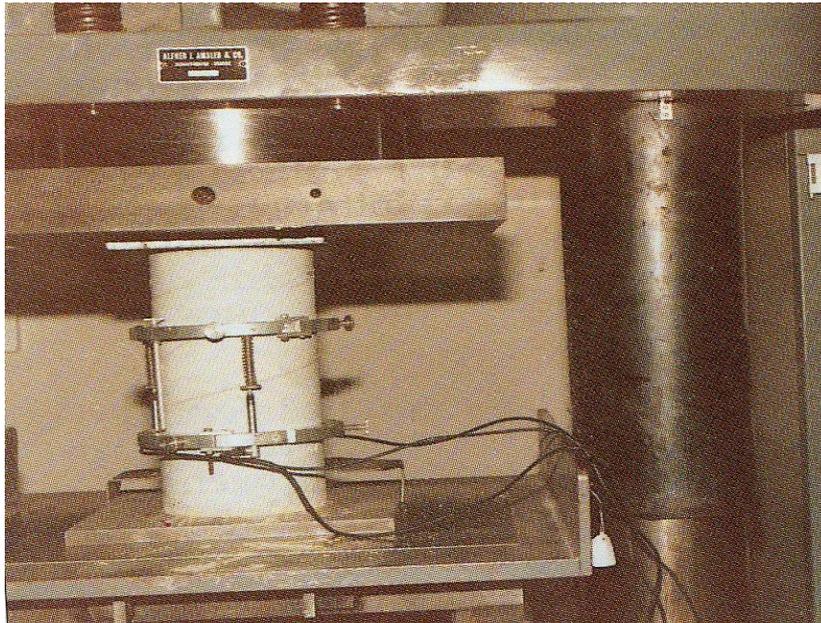


Figure 2.5. Système de mesure du module d'élasticité (Sablocrete, 1994).

2.2.5 Flexion

Les essais ont concerné des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ obtenues par sciage dans les caisses normalisées. Les échéances de mesure étaient de 3, 7, 14, 21, 28, 45 et 60 jours. Chaque mesure représente la moyenne de trois tests.

2.2.6 Essai de retrait

Le retrait a été mesuré sur six prismes ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) obtenus sous effet de projection, pour chaque type de béton. Les déformations sont relevées à l'aide d'un rétractomètre (Figure 2.6), une heure après le démoulage effectué au bout de 24 heures. Les conditions de conservation sont les mêmes que celles décrites pour l'essai de compression.

Par ailleurs, les éprouvettes ont fait l'objet d'une pesée à chaque échéance de mesure du retrait. Trois de ces six éprouvettes ont été maintenues en équilibre hygrométrique à l'aide d'une double couche de papier aluminium autocollant, afin de mesurer le retrait endogène. Les échéances de mesure étaient de 1, 3, 7, 14, 21, 28, 40, 60, 120 et 180 jours.



Figure 2.6. Appareil de mesure du retrait.

2.2.7 Porosité

La porosité totale accessible à l'eau P [%] est mesurée selon la méthode suivante : trois disques de 14 cm de diamètre et 7 cm d'épaisseur, carottés dans les bétons projetés dans des caisses normalisées similaires à celles décrites dans la section 2.2.1. Ces disques sont saturés et pesés à l'eau (M_{air}). Les disques sont ensuite séchés sous 105°C dans une étuve jusqu'à masse constante (M_{sec}). Il faut s'assurer que deux pesées prises en l'espace de 24h ne présentent pas de différence de plus de 0.005g

Cette valeur P [%] représente le rapport du volume des pores pénétrés par l'eau au volume apparent de l'échantillon et est donnée par la relation : $[(M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau})] \times 100$

Quant à la compacité C_p [%], elle est obtenue par la relation : $C_p = 1 - P$ [%]

2.2.8 Porométrie

La technique consiste à injecter dans un échantillon de béton du mercure à des pressions croissantes et à enregistrer simultanément le volume de mercure qui pénètre dans les pores de l'échantillon. Nous obtenons alors la relation : $P = f(V)$.

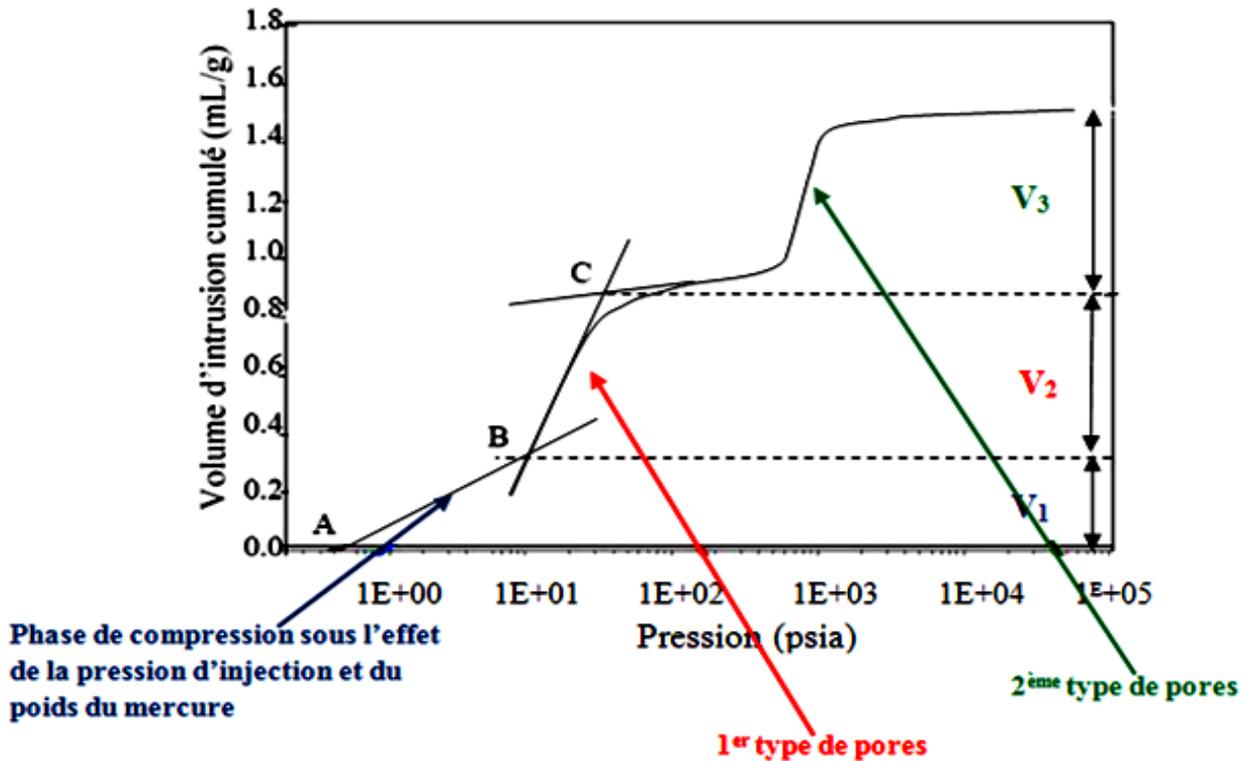


Figure 2.7 Relation $P = f(V)$

(Figure tirée de : « Laboratoire de Génie Chimique SAP Service Analyses et Procédés »
 Website : http://www.lgc.cnrs.fr/IMG/pdf/POROSIMETRIE_-_Gwenaelle_Raimbeaux.pdf)

La loi de Laplace donne la relation entre la pression de mercure et le rayon minimum des pores pénétrés par le mercure, et assimilés à des cylindres.

$$P = 2 \frac{\gamma \cdot \cos\theta}{r}$$

* P : Pression de mercure

* γ : Tension superficielle de mercure = 0.4N/m

* θ : Angle de contact mercure-paroi de pore = 135 à 140°

* r : Rayon de pores pénétrés par le mercure

2.4 Formulation des bétons étudiés

2.4.1 Principe de formulation du béton de sable projeté [BSP]

Les constituants du béton de sable projeté [BSP] sont les mêmes que ceux des bétons vibrés avec, cependant, des tailles de granulats inférieures ou égales à 5 mm et une grande quantité de fines. Toutefois, pour augmenter les performances, divers additifs (polymères, fibres) peuvent être incorporés. En raison de sa finesse, ce mélange nécessite une forte demande en eau et une grande quantité de ciment, afin de parvenir à une fluidité désirée. Cependant, un

fort dosage en eau conduit à des effets négatifs dont l'augmentation de la porosité, le ressuage et la ségrégation.

Par ailleurs, une haute teneur en ciment peut provoquer des déformations différées (retrait et fluage) importantes. Par conséquent, un superplastifiant réducteur d'eau et une grande quantité de fines sont ajoutés afin d'augmenter la fluidité, la viscosité et l'aptitude au pompage.

La méthode choisie est basée sur le principe de l'optimisation de la compacité du squelette granulaire tout en intégrant l'aptitude au pompage.

Pour cela, nous avons adapté la relation mathématique de Caquot reliant le volume des vides (V) du mélange granulaire à son étendue granulaire (d/D).

$$V = V_0 (d/D)^{1/5} \dots\dots\dots(1)$$

Avec V_0 : constante expérimentale variant de 0,7 à 0,8.

L'étendue granulaire de sable étant de 80 μm à 5 mm, nous admettons donc que le mélange présente une porosité :

$$P = 0,75 (0,08/D)^{1/5} (\% \text{ volumique}) \dots\dots\dots(2)$$

Le dosage volumique optimal en fines correspond à la quantité de fines nécessaire pour combler cette porosité et donc optimiser la compacité.

En désignant par [F] le volume de fines et [V] le volume de vide correspondant, Caquot a obtenu le résultat suivant :

$$F = 1/2 V \dots\dots\dots(3), \text{ l'hypothèse est que le volume de fines nécessaire correspond à la moitié de la porosité, c'est-à-dire } 1/2 P.$$

Par conséquent, le dosage volumique optimal en fines s'écrit en combinant (2) et (3) :

$$F = 0,38 (0,08/D)^{1/5}$$

$$D = 5 \text{ mm} \Rightarrow F = 166 \text{ l/m}^3.$$

Porosité et dosage en eau

Au dosage en eau, sont subordonnées nombre de performances, et notamment le rebond du matériau. Un manque d'eau découle sur une hydratation insuffisante et donc des pertes par rebond importantes ainsi qu'une mauvaise qualité de parement. A l'inverse, un excès d'eau affecte la consistance et contribue à l'apparition de coulées. Ce dosage en eau joue aussi un rôle primordial dans la pompabilité (écoulement) du mélange dans les conduites ; d'où la difficulté à trouver un compromis acceptable.

La relation mathématique de Caquot reliant le dosage en eau [e], le volume de l'air piégé [V] d'une part et l'étendue granulaire de l'autre, s'écrit :

$$(e + v)_{\min} = 0,08 (d/D)^{0,2}.$$

En raison de l'usage d'un superplastifiant, le BSP est considéré comme mélange défloculé et donc, la valeur de « d » peut être définie comme la moyenne harmonique de la taille des grains (assimilés à un volume sphérique) du constituant le plus fin. De ce fait, le diamètre moyen des grains est donné par la formule suivante :

$$d = 60/f \cdot \rho \text{ mm ; où } f : \text{ finesse Blaine et } \rho : \text{ densité.}$$

$$\text{Avec } f = 3950 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ et } \rho = 3,1 \text{ g/cm}^3$$

$$\Rightarrow d = 0,0049.$$

Pour estimer la teneur en eau, le volume d'air piégé doit être déterminé. Un ordre de grandeur peut être obtenu comme suit :

$$V_{\text{vides}} = K \cdot \text{eau} \text{ (l/m}^3\text{)}$$

$$K = 0,2 \div 0,25, \text{ on prendra } K = 0,2$$

$$V = 0,2 \times 166 \text{ l/m}^3 = 33 \text{ l/m}^3 \text{ (3,3\%)}$$

$$E = 167 \text{ l/m}^3$$

Evaluation du dosage en sable

Sable [S] = 1000 – fines [F] – eau [E] – air [A] – superplastifiant [Sp].

Avec $1,5 \text{ l/m}^3$ pour le dosage en superplastifiant, $S = 632,5 \text{ l/m}^3$, et avec une densité pour le sable de 2,7 ; $S = 1707 \text{ kg/m}^3$.

En prenant en considération les 15% des fines calcaires inclus dans le ciment, la quantité totale en fines dans le mélange est de $F + 15\%C$

Le facteur d'activité des fines étant de $F/C = 0,8$, on a :

$$F + 15\%C = 0,8 \times 85\% \Rightarrow C = 0,53C$$

$$F/C = 0,53 \text{ (3,1/2,7)} = 0,61$$

$$F + C = 166 \text{ l/m}^3$$

$$C = (166/1,61) \times 3,1 = 320 \text{ kg/m}^3.$$

$$F = 0,61C \Rightarrow F = 0,61 \times (166/1,61) \times 2,7 = 170 \text{ kg/m}^3.$$

2.4.2 Formulation du béton ordinaire projeté [BOP]

Nous avons pris en considération la composition traditionnelle utilisée dans la projection du béton dans les ossatures en panneaux 3D servant à la réalisation des structures en RDC et RDC + 1 étage. Le maintien de cette composition se justifie par le fait que l'objectif premier de cette thèse était de trouver une formulation de BSP pouvant se substituer, justement, à cette formulation qui est habituellement utilisée.

2.4.3 Formulation du béton vibré [BV]

La formulation prise en compte est celle généralement conduisant à des classes de béton (25/35 MPa). Son obtention est basée sur la méthode Baron-Lesage mise au point au LCPC.

Les trois hypothèses sur lesquelles se basent cette méthode sont :

- 1) une compacité maximale avec un E/C donnant une maniabilité optimale.
- 2) un rapport G/S correspondant à cette compacité maximale et une quantité de fibres n'impliquant pas de modifier les précédentes hypothèses.

Le tableau 2.4 résume les compositions des bétons d'essais (BSP, BOP et BV).

Tableau 2.4 Composition des BSP, BOP et BV [kg/m³].

	BOP	BSP	BV
Ciment	400	320	320
Fillers calcaires	-	170	-
Sable	1250	1707	680
Eau	180	167	170
Gravillons 3/8 mm	500	-	450
Gravillons 8/15 mm	-	-	770
Superplastifiant réducteur d'eau	1,5	1,5	-

Remarque : le béton vibré ne va servir que comme témoin dans l'étude du retrait du BSP.

2.4.4 Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons étudiés

Elles sont résumées dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons d'essais.

	BSP	BOP	BV
R _{c28} [MPa]	27	29,7	32
E [MPa]	24000	29000	31000
Porosité [%]	22	27	16
C _p : Compacité [%]	78	73	84
E/C	0,522	0,45	0,531
E/Fines	0,341	0,45	-
V _p : Volume de pâte [%]	37	34	28

Par ailleurs, les courbes granulométriques des bétons projetés (BSP et BOP) sont représentées par la figure 2.8.

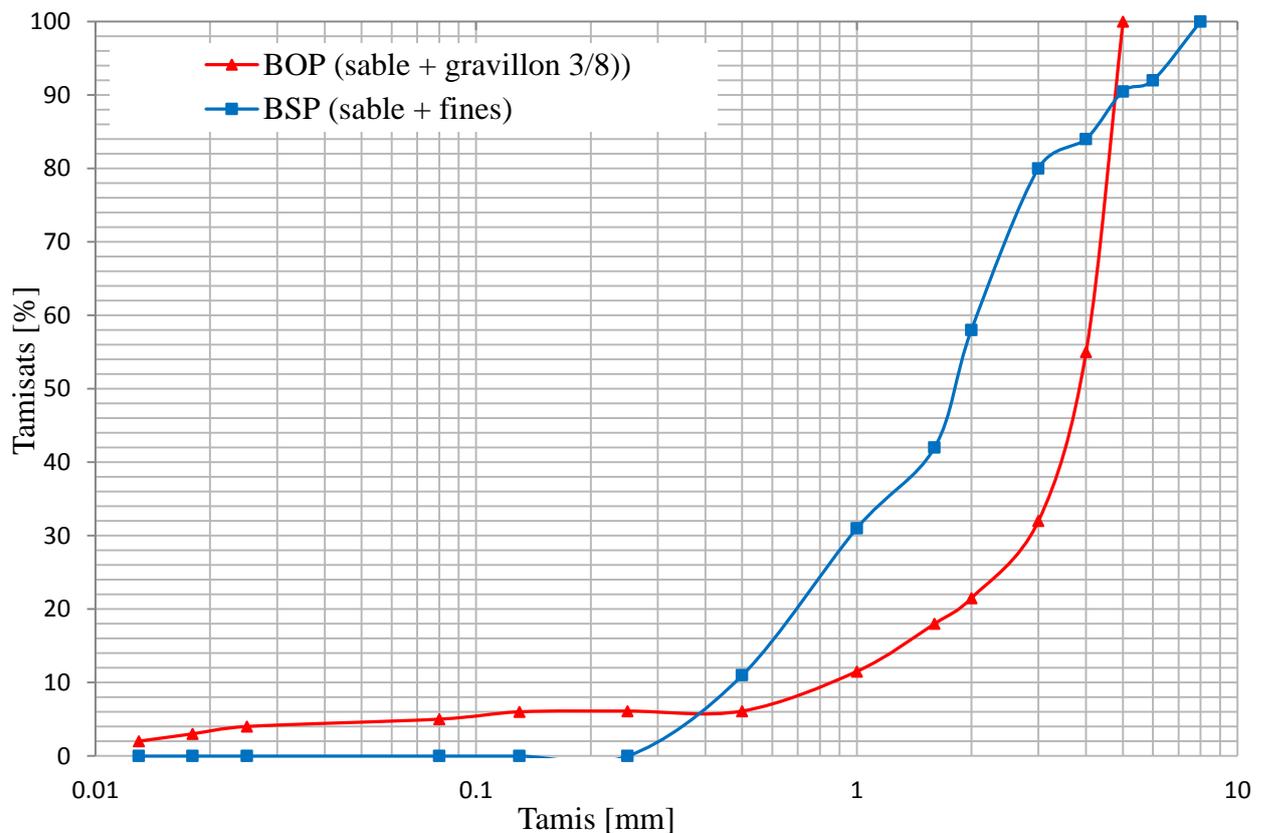


Figure 2.8 Courbes granulométriques des bétons projetés (BSP et BOP).

2.4.5 Analyse de la formulation du BSP

Du moment qu'un dosage élevé en ciment impacte négativement le coût du béton d'une part, et affecte les performances mécaniques (retrait et fluage), notre formulation semble d'un intérêt certain étant donné son faible dosage en ciment (320 kg/m^3), comparé à celui du béton ordinaire projeté où le dosage peut atteindre 400 kg/m^3 .

La réduction de la quantité de ciment se répercute aussi favorablement sur les émissions de gaz, étant donné la grande énergie que nécessite la fabrication du ciment, d'où un impact favorable du point de vue économique et environnemental.

L'autre intérêt que présente cette formulation du BSP est qu'elle est dépourvue de gros granulats, d'où des coûts réduits du béton dans les zones pauvres en gros gravillons et riches en sable, à l'instar du grand sud Algérien.

L'expérience de la projection, a montré que ce sont les particules fines qui adhèrent plus aisément au substrat et que les particules grossières (gravillons) sont, elles, sujettes au rebond. De ce fait, il est plus que probable de voir le BSP offrir un meilleur comportement vis-à-vis de l'adhérence au support et l'aptitude à la projection étant donné sa grande finesse. L'autre désavantage dont souffre le BOP, à savoir une non homogénéité du matériau en place sur le support en raison de la différence de composition entre le matériau en place et le rebond, semble ne pas être d'actualité dans le cas du BSP, où la composition du béton sur le support et celle du rebond ne diffère certainement que très peu.

Ceci est conforté par l'absence de ségrégation et de ressuage dans le cas du BSP comme l'a montré l'essai d'étalement.

Enfin, nous n'avons pas jugé nécessaire d'envisager l'usage de la fumée de silice dans la composition de ce matériau étant donné son coût prohibitif. De plus, des essais effectués par Gérôme (2003) ont montré qu'un dosage en fumée de silice de l'ordre de 15 kg/m^3 de béton projeté par voie humide n'a eu aucune incidence sur les pertes par rebond. Par contre, le mélange adjuvanté en fumée de silice a généré plus de pertes de fibres par rapport à un mélange sans fumée de silice (13% contre 8%). D'autre part, un dosage, selon le même auteur, de 3,8% du poids de ciment n'a augmenté la résistance que de 8% à 28 jours. L'augmentation de la résistance dans la technique de projection au-delà du seuil nécessaire ne peut être que source de fragilité du matériau en raison d'une moindre déformabilité.

Conclusion

L'usage d'outils complémentaires telles que la gammadensimétrie, la diffractométrie aux rayons x et les observations au microscope à balayage auraient pu contribuer à appréhender de

façon plus poussée la qualité du béton de sable projeté, mais faute de temps, cela n'a pu être possible.

Tout comme, on aurait voulu compléter nos connaissances sur le comportement du béton projeté vis-à-vis du fluage. La non disponibilité de bûtes de fluage ainsi que les délais de soutenance de cette thèse ne nous ont pas autorisés à mener ces essais.

Il aurait été aussi bénéfique d'aborder la rhéologie du béton de sable projeté car elle conditionne de façon décisive le comportement du béton à l'état frais et notamment durant la projection. Par conséquent, la quantité de matériaux (béton, fibre, etc.) perdus par rebond reste tributaire de la rhéologie. Ceci est d'une importance capitale quand on sait les répercussions du rebond sur la qualité du béton projeté ainsi que sur les coûts de production

Cependant, nous estimons que le corpus expérimental de cette recherche a été concluant et conséquent dans l'approche du comportement du béton de sable projeté à l'état frais et durci.

Toutefois, les résultats sont sujets à amélioration et à confirmation en procédant à un nombre plus élevé d'essais grandeur nature. Des essais de projection sur panneaux disposés horizontalement pour simuler les panneaux-dalles doivent impérativement compléter les connaissances acquises sur la projection.

CHAPITRE 3

COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE PROJETE [BSP] A L'ETAT FRAIS

CHAPITRE 3

COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE PROJETE [BSP] A L'ETAT FRAIS

Introduction

La qualité du béton projeté sur un support dépend du comportement de celui-ci, non seulement à l'état durci mais aussi, et surtout, à l'état frais. Par conséquent, la rhéologie du mélange joue un rôle déterminant du point de vue pompabilité et projectibilité du matériau. Il est utile donc d'analyser les caractéristiques du mélange avant, pendant et après projection.

Après avoir déterminé les voies (sèche ou humide) les plus appropriées pour la projection des bétons d'essais, nous avons comparé leur évolution à l'état frais, à la sortie de la lance et leur comportement mécanique lorsqu'ils ricochent sur le support. Par ailleurs, les taux de pertes par rebond des différents composants (béton, fibres, agrégats), ainsi que la qualité de surface et les épaisseurs de couches projetées ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

L'étude a été complétée par l'analyse des compositions des rebonds et de l'impact des fibres métalliques sur la projectibilité.

Les essais de projection ont lieu sous une température variant de 22 à 28°C.

3.1 Choix de la méthode de projection des bétons projetés [BSP et BOP]

3.1.1 Béton ordinaire projeté [BOP]

Il est prouvé que la technique de projection la plus appropriée pour le BOP est la voie sèche [VS] [ASQUAPRO, 2005 ; AFTES, 1994] car donnant de meilleures performances mécaniques avec, cependant, des pertes par rebond plus importantes. Par ailleurs, comme la voie sèche est celle utilisée actuellement en Algérie dans la conception des panneaux 3D, et que l'objectif est de comparer cette formulation avec celle que nous proposons, nous avons conservé cette composition du mélange avec la technique de projection habituelle. Ceci est fait dans un souci de comparer chaque composition dans son contexte optimisé.

La machine utilisée dans la projection du BOP par voie sèche fonctionne sur le principe du rotor avec un débit d'air comprimé de 10 000 litres/mn, une pression d'eau de 8 bars et une pression de transfert de 40 bars.

3.1.2 Béton de sable projeté [BSP]

Pour le choix de la technique de projection la plus adaptée pour le BSP, nous avons procédé à la projection du mélange sur six panneaux de 300 cm x 100 cm, trois par voie sèche [VS] et trois par voie humide [VH]. Les paramètres de comparaison sont listés dans le tableau 3.1.

La machine de projection par voie humide fonctionne sur le principe de la pompe à béton, avec un débit de 12 M³. Le compresseur dispose d'une pression de 1.2 bars.

Tableau 3.1. Paramètres de comparaison du BSP projeté par V.S et V.H.

	Voie sèche	Voie humide
R _{c7j} [MPa]	12,5	11,3
Qualité des couches projetées	Médiocre	Très bonne
Perte par rebond [%]	27	13
Qualité du rebond (visuelle)	Médiocre	Bonne
Effet de martèlement	Oui	Non
Dégagement de poussière	Oui	Non
Epaisseur des couches projetées [cm]	05	09

L'évaluation des rebonds a été faite par simple pesée des matériaux récupérés lors des essais de projection. A la lecture des facteurs pris en considération dans l'analyse comparative, il s'avère que la voie humide donne de meilleurs résultats. En effet, le taux de pertes par rebond, la qualité du parement et l'épaisseur des couches de béton projeté se montrent nettement à l'avantage de la voie humide par rapport à la voie sèche, en dépit d'une résistance à la compression inférieure de l'ordre de 10% à 7 jours d'âge. A noter aussi que la vitesse de projection par VH est moins importante que celle de la VS (120 m/s contre 50 m/s), d'où une économie d'énergie. Ceci va dans le sens des conclusions du projet SABLOCRETE (1994) et des travaux de Benaissa (1992).

3.2 Optimisation des formulations BSP et BOP par ajout de fibres

Il est bien connu que l'ajout de fibres métalliques améliore généralement le comportement des bétons vis-à-vis de la tendance à la fissuration d'une part et influence positivement le

comportement vis-à-vis des déformations différées (retrait et fluage). C'est la raison pour laquelle, nous avons décidé d'ajouter une quantité de fibres métalliques aux deux mélanges (BSP et BOP), telle que l'ouvrabilité ne soit pas modifiée afin d'éviter de réajuster les formulations prédéterminées.

La détermination de cette quantité de fibres s'est faite en faisant varier l'étalement (ϵ) en fonction du dosage en fibres métalliques [FM]. Le dosage en FM choisi est celui correspondant au dosage maximal pour lequel l'étalement n'est pas affecté.

3.2.1 Dosage en fibres métalliques du BSP

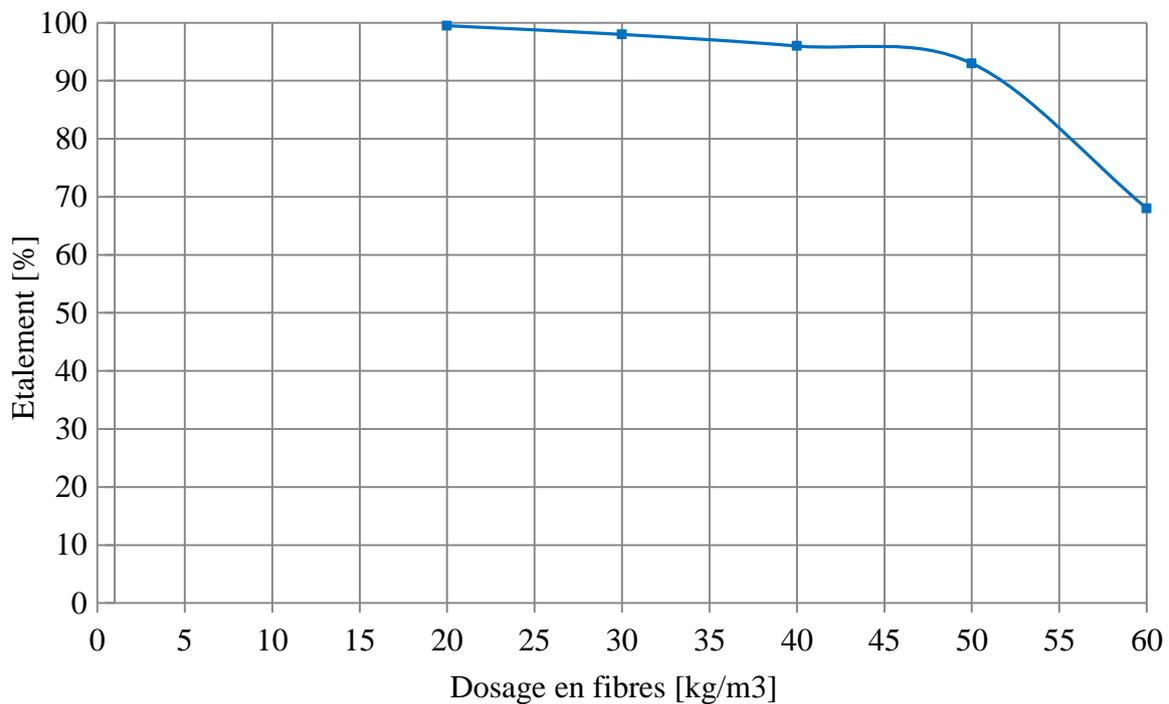


Figure 3.1 L'étalement en fonction du dosage en fibres du BSP.

A la lecture de la courbe précédente, il s'avère qu'un dosage de 50 kg/m³ en fibres métalliques n'affecte point la rhéologie. Au-delà de cette valeur, on assiste à une chute brutale de l'ouvrabilité.

Par conséquent, le BSP sera dosé en FM à raison de 50 kg/m³.

3.2.2 Dosage en fibres métalliques du BOP

Même constatation que pour le BSP (Fig3.2), avec cependant un dosage de 55 kg/m³. On prendra un dosage de 50 kg/m³.

L'ajout de cette quantité de fibres métalliques n'affecte en rien les dosages précédemment déterminés des autres ingrédients comme le stipule Rossi (1998), c'est-à-dire sans besoin de réajuster les formules précédemment établies.

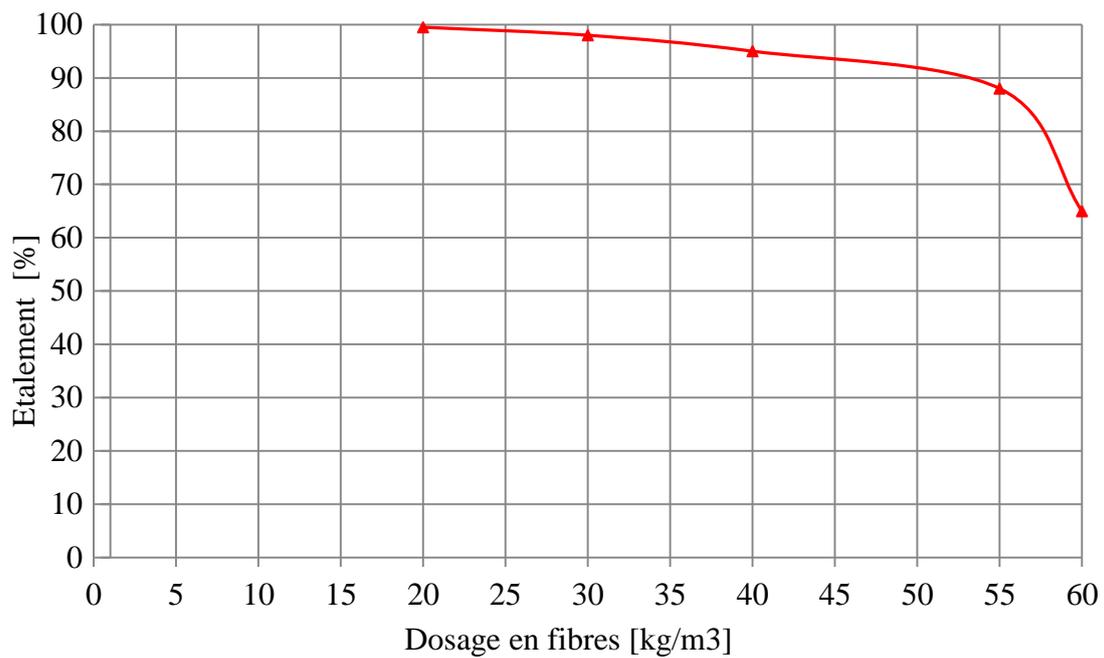


Figure 3.2 L'étalement en fonction du dosage en fibres du BOP.

Les formulations des BSP et BOP sont illustrées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Composition des BSP et BOP [kg/m³].

	BSP	BOP
Ciment	320	400
Sable	1707	1250
Gravillons (≤ 8 mm)	-	500
Fillers calcaires	170	-
Fibres métalliques	50	50
Superplastifiant réducteur d'eau [%]	1,5	1,5
Eau	167	180

Il est clair qu'il ne s'agit là que d'un enrichissement des mélanges en fibres métalliques, et non d'une optimisation absolue des mélanges en dosage en fibres.

En effet, une étude plus détaillée de l'impact des fibres aurait nécessité d'aborder la rhéologie des bétons d'essais fibrés sans se mettre la contrainte du maintien des dosages des autres ingrédients.

Une étude approfondie aurait aussi nécessité d'aborder l'impact de la nature des fibres utilisées (synthétique ou métallique) ainsi que leurs caractéristiques géométriques (longueur et diamètre) sur les performances du béton et notamment sa rhéologie. Cependant, ceci ne constituait pas en soi, un des objectifs de cette recherche.

3.3 Effet des fibres métalliques sur la projection

Des essais de projection du BSP, similaires aux précédents, ont été menés afin d'apprécier l'impact des fibres métalliques sur la qualité de la pompabilité et de la projection.

La pompabilité et la projection se sont déroulées sans contrainte notable, et la qualité de surface des couches projetées ne différaient pratiquement pas de celles des résultats d'essais de projection avec la formule sans fibres. Ceci confirme qu'effectivement un faible dosage en FM n'affecte pas la rhéologie et donc n'a aucune incidence sur le comportement des mélanges vis-à-vis de la projection. Nous n'avons pas constaté d'agglomération de fibres dans le conduit de la lance ni d'obturation des conduites lors de la projection.

3.4 Caractérisation des bétons d'essais à l'état frais (avant projection)

Les caractéristiques rhéologiques du mélange dans le procédé de projection par VH sont d'une importance capitale et ce, de la phase où le mélange est préparé jusqu'à sa mise en place sur le support, comme le souligne Austin et al. (2005).

Les principales questions relatives au béton à l'état frais qui se posent souvent peuvent se résumer dans ce qui suit : quel est le volume du rebond du matériau et quelle est l'épaisseur de la couche projectable dans de bonnes conditions, et avec un bon fini de surface. Par conséquent, nous allons caractériser les mélanges avant, pendant et après le processus de projection.

3.4.1 Caractérisation avant la projection

a) Béton de sable projeté

L'étalement mesuré est de 90%. Il est intéressant de noter que les deux diamètres perpendiculaires mesurés et ayant servi au calcul du diamètre final moyen (D_f) nécessaire pour l'évaluation de l'étalement ne présentaient pratiquement aucune différence. Ceci confirme qu'effectivement le mélange est homogène. Par ailleurs, nous n'avons pas noté

d'auréole hydrique ou d'efflorescence ; d'où une absence de ressuage. Visuellement, le mélange était pâteux et offrait une bonne cohésion. Nous avons observé aussi une légère thixotropie. Il est connu que pour une bonne adhérence au substrat, des étalements proches de 100% sont souvent nécessaires. Les valeurs recommandées par Raoux (1994) pour les bétons de sable projetés sont de l'ordre de 80 à 120%

b) Béton ordinaire projeté

L'étalement mesuré est de 85%. Si cet essai a montré que le mélange ne présentait pas de ressuage, il en va autrement pour la ségrégation. En effet, nous avons enregistré une « galette », issue de la vibration, qui n'était pas bien circulaire, ceci dénote d'une ségrégation certaine. Quant à la consistance, la fluidité était quelque peu gênée par le freinage de l'écoulement qu'induisaient les gros gravillons.

c) Béton vibré

L'affaissement au cône d'Abrams s'échelonnait entre 8 et 10 cm pour cinq tests opérés, et La consistance était plastique.

3.4.2 Caractéristiques à la sortie de la lance des bétons de sable et ordinaire projetés

La compétence du porte lance est nécessaire pour une bonne évaluation des paramètres liés à la technique de projection (réglage des débits d'air et d'eau, distance entre buse de la lance et le substrat, etc.).

A la sortie de la lance, le béton de sable projeté est fluide, et donc facile à pomper. Ceci est dû à la distribution de la taille des particules du filler calcaire et au diamètre limité des granulats ($\varnothing \leq 5$ mm). L'aspect du mélange se présente sous la forme de masselottes de béton de consistance plastique.

Dans le cas du béton ordinaire projeté, la présence de gros granulats (3/8 mm) semble compliquer légèrement le processus de projection. En effet, de temps à autre, on assiste à une obturation de la buse due à la formation de bouchons constitués, pour l'essentiel, de conglomérats de grosses inclusions (3/8 mm). Les fibres peuvent aussi être source de blocage par le mécanisme de frottement du mélange avec le tuyau de transfert.

Par ailleurs, des essais préliminaires ont montré que la distance optimale entre la buse de la lance et le panneau était de 0,80 m pour le béton de sable projeté et 1,20 m dans le cas du béton ordinaire projeté.

Notons la faible vitesse de projection du béton de sable projeté par voie humide par rapport au béton ordinaire projeté par voie sèche, ce qui conduit à des énergies de mise en place du béton

de sable projeté moins importantes que dans le cas du béton ordinaire projeté, d'où des économies de coûts de mise en œuvre.

Les données de la littérature [ASQUAPRO, 2005 ; ASQUAPRO, 2002 ; SABLOCRETE, 1994 ; Gérôme, 2003] montrent que par voie humide, la vitesse de projection est de 50 à 100 m/s ; alors que par voie sèche, la vitesse peut atteindre 150 m/s.

La raison à cela est que par voie sèche, la compacité du mélange en place sur le support est optimisée grâce à l'effet de martèlement des grosses inclusions sur la matrice. Pour ce faire donc, une certaine énergie de compactage est nécessaire, et par conséquent une vitesse de projection plus importante.

Dans le cas du béton de sable projeté par voie humide, l'aspect collant du matériau favorise le collage de la pâte sur le support et réduit donc les besoins en énergie nécessaire pour l'adhérence du mélange sur le panneau, d'où une vitesse de projection réduite.

3.4.3 Qualité de surface

Principe de la méthode (sans contact) de l'exploration de la rugosité de surface

L'échantillon de béton est éclairé par une source lumineuse blanche filtrée dont 50% du faisceau est projeté sur une surface de référence grâce à une lame séparatrice. L'autre partie du rayon lumineux éclaire la surface de l'échantillon. Les faisceaux ainsi réfléchis se combinent sur la surface séparatrice et interfèrent. Les différences d'amplitudes entre l'échantillon et le plan de référence produisent une figure d'interférence traduisant l'aspect de surface de l'échantillon. Ces écarts d'amplitudes (altitudes) sont enregistrés et traités informatiquement de manière à reconstituer la surface mesurée de l'échantillon dans son intégralité. Ainsi, il est possible de déterminer la rugosité de surface et se faire même une représentation 3D.

Les figures 3.3a et 3.3b montrent les textures de surface des deux mélanges, obtenues par traitement informatique de la rugosimétrie tridimensionnelle. Les figures montrent que le béton de sable projeté offre une qualité de surface plus fine que celle du béton ordinaire projeté. En effet, l'amplitude des pics caractérisant la texture du BSP est moins prononcée que celle des pics du BOP (90 μm contre 550 μm).

On peut aussi observer, à travers ces figures, que la texture du BSP est plus dense que celle du BOP. Cette texture particulière du béton de sable projeté s'explique, à l'évidence, par la finesse des constituants et la grande quantité de fillers calcaires. Cette surface fine peut être attribuée aussi à l'absence de ségrégation et de ressuage, comme constaté lors de l'essai

d'étalement. Cette qualité de parement est semblable à celle du béton de sable vibré comme le montre les travaux menés dans le cadre du projet SABLOCRETE (1994).

Dans le cas du béton ordinaire projeté, l'impact des grosses inclusions sur la pâte, durant le processus de projection, conduit à la formation de cavités, ce qui rend la texture de la surface plus rugueuse.

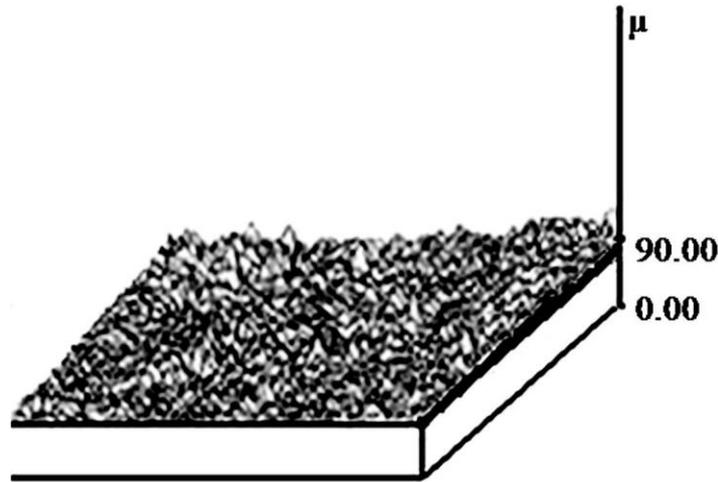


Figure 3.3a BSP

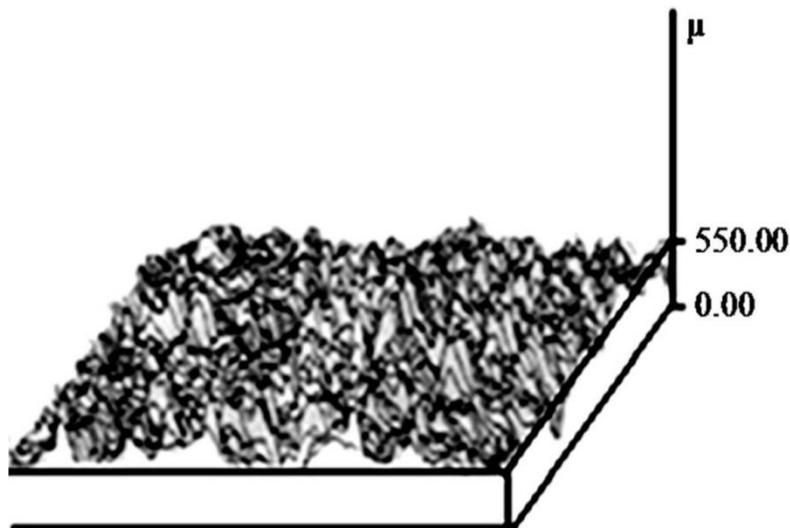


Figure 3.3b BOP

Figure 3.3 Traitement informatique de la rugosité tridimensionnelle.

Le caractère non fissurant du parement du BSP mis en évidence par l'observation visuelle est un atout certain pour la bonne tenue du matériau vis-à-vis de la durabilité, alors que celui du BOP présente un réseau de fissuration plus ou moins important. Ce caractère peu fissurant du BSP par rapport au BOP est à mettre sur le compte de l'absence de ressuage et de ségrégation dans le cas du BSP. Ajouté à cela, une meilleure homogénéité du BSP due à des

rebonds de composition similaire au matériau en place. Ce caractère peu fissurant a été mis en relief aussi dans le cas du béton de sable vibré par Benaïssa et al.(1993).

Des techniques plus modernes permettent de prendre en compte dans les critères de l'évaluation de la rugosité aussi bien les amplitudes de pics que la distance moyenne entre ces pics. La prise en compte de ces deux paramètres traduit de meilleure façon la rugosité.

Cet avantage que procure le béton de sable projeté par VH par rapport au béton ordinaire projeté par VS peut être attribué à l'aspect visqueux et collant du mélange.

La finesse des composants du béton de sable projeté combinée avec le superplastifiant pourrait avoir joué aussi un rôle non négligeable dans cet aspect de surface.

3.4.4 Epaisseur des couches du béton projeté

L'épaisseur maximale des couches projetées est l'épaisseur admissible d'un mélange projeté sur le panneau sans ricochet ou décollement, avec un bon fini de surface. Elle se mesure grâce à des puges mises en place sur les panneaux.

Les valeurs indiquées correspondent à des épaisseurs de couches projetées facilement atteignables. L'épaisseur atteinte dans le cas du béton de sable projeté est de 90 mm en un seul passage (monocouche). Alors que la valeur atteinte dans le cas du béton ordinaire projeté est de 60 mm, toujours en une seule passe.

Par rapport donc à ce facteur, la projection se montre à l'avantage du béton de sable projeté.

Cependant, des tests d'adhérence des mélanges frais sur des couches de béton durci de même nature, ont montré que le béton ordinaire projeté adhère mieux que le béton de sable projeté. Ceci s'explique, certainement, par la rugosité de la surface du béton ordinaire projeté qui favorise l'accrochage de nouvelles couches de béton frais. Alors que dans le cas du béton de sable projeté, la texture fine du béton durci semble être un handicap vis-à-vis de l'adhérence.

L'aspect visuel d'une pastille prise dans les panneaux ayant servi à la projection a montré que la couche de béton située en amont et en aval du TS ne présentait pas de différence notable. Autrement dit, le béton s'est mis en place derrière le TS aussi aisément que devant le TS, c'est-à-dire que ce dernier n'a pas constitué en soi un obstacle à la projection. Par conséquent, on peut affirmer que le BSP est tout à fait homogène dans son épaisseur.

Par contre, dans le cas de la pastille prise dans le BOP, la couche de béton souffre d'une ségrégation structurelle, c'est-à-dire que le béton a du mal à se mettre en place correctement

derrière le TS. En effet, on a constaté que la couche de béton située derrière le TS est moins compacte en comparaison avec celle située en avant le TS.

3.4.5 Pertes par rebond

Le rebond est constitué par le matériau qui, ayant passé par la lance, ne se colle pas sur la surface de projection. Ces pertes sont indissociables des processus de projection et de la qualité du matériau projeté. Ces exigences font l'objet d'un compromis dans le choix de la vitesse de projection.

Le rebond du matériau est un facteur important dans l'appréciation de la qualité de la projection et donc de la qualité du produit fini en place sur le support. C'est aussi un indicateur économique du béton projeté.

Par conséquent, il est intéressant de comparer les rebonds du matériau des deux mélanges mais aussi la qualité du rebond par rapport au mélange à projeter, à travers la détermination des pertes par ricochet des fibres et des gros granulats (cas du BOP).

L'évaluation des quantités du rebond a été déterminée par simple pesée des matériaux récupérés lors des essais de projection.

Le poids du rebond en (%) [R_m] a été obtenu à l'aide de la relation :

$$R_m = (P_r / P_p) \times 100 ; \text{où}$$

P_r : Poids du rebond

P_p : poids total du matériau projeté

- L'évaluation du rebond des gros granulats dans le cas du béton ordinaire projeté, s'est faite de la même façon que pour le rebond du béton, mais en les lavant sur un tamis de maille 3 mm et en les séchant.

- Les pertes en fibres ont été déterminées suivant la méthode de Bindiganavile (2001). Le matériau issu du rebond a été pesé, puis lavé. Les fibres métalliques ont été séparées, lavées, séchées et pesées [P_{FM}].

$$P_{FM} = (V_f \cdot P_p) / (\rho_f \cdot \rho_B)$$

ρ_f : densité des fibres

ρ_B : densité du béton

V_f : volume de fibres

P_p : poids du matériau projeté

Les différentes valeurs obtenues sont consignées dans le tableau 3.3.

$$R_f = 100 \times (P_{FR} / P_{FM}).$$

3.4.5.1 Pertes par rebond du béton

Les pertes par ricochet du BSP sont deux fois moins importantes que celles du BOP (13% vs 27%). Le taux de perte caractérisant le BOP, de l'ordre de 24%, est tout à fait comparable à la plage des valeurs caractérisant les essais de Jolin et al. (1999) menés sur des bétons projetés par voie sèche et ayant donné des pertes de 15 à 36%. Gérôme (2003) trouve, pour des bétons projetés par VS, des pertes par rebond de 20 à 50%.

Par ailleurs, le taux de 13% de pertes par rebond du BSP ne diffère que peu de celui mesuré par Benaïssa et al. (2008). L'auteur trouve, en effet, un taux de perte de 15% pour un béton de sable projeté par voie humide. L'autre résultat intéressant est que l'aspect visuel de la composition du rebond du BSP semble être sensiblement le même que celui du matériau en place. Tandis que dans le cas du BOP, le rebond est caractérisé par un faible volume de pâte et un surdosage en gros gravillons (3/8 mm). La perte la plus importante en grosses inclusions du BOP, a été enregistrée au début du processus de projection. En effet, à cette étape, les grosses inclusions entrent en contact avec le support et ricochent sur le sol car la couche initiale ne s'est pas complètement constituée pour faciliter l'adhésion du matériau. La première couche du béton projeté sur le support est enrichie donc en pâte de ciment et appauvrie en gros granulats, d'où une absence d'homogénéité transversale du béton sur le support et donc une ségrégation structurelle.

Dans le cas du BSP, la finesse du matériau et l'aspect visqueux et collant de la pâte entraînent un collage immédiat du mélange sur le support avec de faibles pertes par ricochet.

Les rebonds ont été caractérisés quantitativement à travers les paramètres consignés dans le tableau 3.3.

3.4.5.2 Caractérisation des rebonds

Nous avons procédé à l'analyse comparative de certains facteurs caractérisant la formulation du matériau à projeter, et ceux du rebond issu du même matériau.

Les paramètres pris en compte sont la teneur en eau, les dosages en fibres, sable et gros gravillons.

- La teneur en eau du rebond a été déterminée par simple pesée, avant et après étuvage.
- La teneur en fibres métalliques a été déterminée par simple pesée effectuée après lavage sur un tamis ($\varnothing \leq 80 \mu\text{m}$) et séchage.
- La teneur en sable a été déterminée par simple pesée après lavage sur un tamis de $80 \mu\text{m}$ et étuvage. Il en est de même pour les gravillons lavés sur un tamis de 3 mm.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 3.3. Chaque valeur représente la moyenne de trois tests effectués sur trois échantillons de 2 kg chacun récupérés dans le rebond. Les valeurs des dosages dans le tableau sont exprimées par rapport à 1 m³.

Tableau 3.3 Caractérisation des rebonds.

		Teneur en eau [l/m ³]	Dosage en sable [80 µm/5mm] [kg/m ³]	Dosage en gros granulats 3/8 mm [kg/m ³]	Dosage en fibres [kg/m ³]
BSP	Avant (formule projetée)	167	1707	-	50
	Rebond	158	1650	-	55
BOP	Avant (formule projetée)	180	1250	500	50
	Rebond	159	1180	780	64

Au vu des valeurs des paramètres de comparaison des caractéristiques des BSP et BOP, nous remarquons qu'effectivement la composition du rebond du BSP ne diffère que peu de la formulation initiale. La conséquence à cela, est que le BSP en place sur le support est homogène et ses performances sont celles attendues du mélange formulé pour être projeté. Alors que le surdosage en grosses inclusions et la chute brutale de la teneur en eau du rebond du BOP, affectent les performances du mélange adhérent sur le substrat.

Comme dans la composition du BSP, on n'a pas utilisé d'accélérateur de prise (raidisseur), il est donc permis de penser pouvoir réincorporer le rebond dans le mélange, comme le stipule Olivares (1992). Cependant, il reste à déterminer dans quelle mesure cela pourrait se faire.

Des essais sur 3 panneaux projetés avec du rebond incorporé à la formule initiale, à raison de 42% en volume, a donné des résistances de 23 MPa à 28 jours. Olivares (1992) trouve, pour un béton projeté par V.S, où on a introduit 25% de rebond, une résistance à 28 jours supérieure à celle de ce même matériau mais sans ajout de rebond. L'auteur ne précise pas l'écart enregistré.

Par contre, dans le cas du BOP, on ne peut réincorporer le rebond dans le mélange ou le réutiliser en l'état en raison de son hétérogénéité. De ce fait, pour atténuer les pertes de matériaux constitutifs de ce rebond, on procède souvent à la récupération des granulats par opération de lavage. Cependant, ceci mobilise beaucoup d'ouvriers et affecte négativement les coûts de fabrication du béton.

3.4.5.3 Perte par rebond des fibres

Le rebond des fibres des deux mélanges, conduit à des teneurs en fibres du matériau en place de 45 kg/m^3 pour le BSP et 36 kg/m^3 pour le BOP. Cela signifie que le fait d'ajouter une grande quantité de fibres au mélange ne se traduit pas nécessairement par une teneur élevée en fibres du béton en place sur le support. Cependant, la différence entre les deux teneurs en fibres du BSP (avant et après projection) est intrinsèquement plus faible que pour le BOP (5 kg/m^3 contre 14 kg/m^3). Ceci contribue à la réduction du coût du mélange du BSP lorsqu'on le compare au BOP, étant donné le prix élevé des fibres métalliques.

Le faible rebond des fibres du BSP peut être dû au volume important de pâte, qui favorise l'enrobage des fibres par celle-ci. Les paramètres impactant la quantité du rebond, peuvent être classés en deux catégories principales : les facteurs de projection (voie sèche ou humide) et ceux liés à la conception du mélange, y compris les teneurs en ciment, fibres et autres ajouts. L'inspection visuelle des carottes extraites des panneaux a montré que les fibres sont réparties de meilleure façon dans le cas du BSP que dans le BOP, en accord donc avec les conclusions de Zellers (2004) et SABLOCRETE (1994).

Conclusion

Les tests ont montré que la projection par VH se montre à l'avantage du BSP par rapport à la VS. L'autre résultat obtenu est qu'un dosage de 50 kg/m^3 de fibre métallique, n'affecte en rien la rhéologie des deux mélanges et ne modifie, par conséquent, ni la pompabilité ni la projectabilité.

Il s'est avéré que le BSP projeté par VH offre la meilleure qualité de surface projetée avec des épaisseurs de couches réalisées en une seule passe plus importantes que dans le cas du BOP (90 mm vs 60 mm).

Par ailleurs, les pertes par rebond du BSP sont deux fois moins importantes que celles du BOP (13% vs 27%). De plus, la composition du rebond du BSP est très proche de celle de ce même matériau en place sur le support, d'où une homogénéité transversale. Alors que, dans le cas du BOP, il n'en est rien. L'autre facteur favorable est que les pertes par rebond des fibres métalliques sont moins importantes que celles enregistrées dans le cas du BOP. Ceci se traduit par un dosage en fibres du BSP en place sur le substrat plus grand que celui mesuré sur le BOP ($45 \text{ kg/m}^3 / 36 \text{ kg/m}^3$).

Les paramètres de projection (distance entre la buse de la lance et le support, les débits d'air et d'eau dans la voie sèche, la vitesse de projection, la gestuelle du porte lance) qui restent l'apanage du porte-lance n'ont pu être étudiés quantitativement dans leur ensemble car cela

aurait nécessité des volumes de béton trop importants par rapport à l'enveloppe financière dont on a disposée gracieusement via l'entreprise chargée des essais sur site. Par ailleurs, les délais de finalisation de cette thèse ne l'auraient certainement pas permis, au vu des durées dans le temps que de telles expérimentations auraient exigées.

CHAPITRE 4

COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE PROJETE A L'ETAT DURCI

CHAPITRE 4

COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE PROJETE A L'ETAT DURCI

Introduction

L'étude du BSP a été comparative avec le BOP et a concerné les résistances à la compression, la traction, le module d'élasticité, la flexion et le retrait (endogène et de dessiccation). A noter que l'étude du retrait a fait l'objet aussi d'une analyse comparative avec un béton vibré [BV] de même classe de résistance, en plus de la confrontation des résultats avec ceux du BOP.

Par ailleurs, l'impact des fibres métalliques sur ces grandeurs a complété les données de ce chapitre. Pour une meilleure approche de la compréhension de la cinétique du retrait de dessiccation, le suivi de l'évolution de la perte en poids des éprouvettes et la porosimétrie à l'eau et au mercure ont constitués des outils non négligeables dans la compréhension des mécanismes de retrait.

4.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est un critère classique d'étude du béton, il est par conséquent intéressant de comparer les résistances du BSP avec celles du BOP. Trois échantillons ont été testés pour chaque béton et à chaque échéance. En plus des mesures relevées sur les BSP et BOP, nous avons mesuré les résistances de ces mélanges sans fibres, afin de mettre en évidence l'impact de celles-ci sur la résistance à la compression. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 4.1.

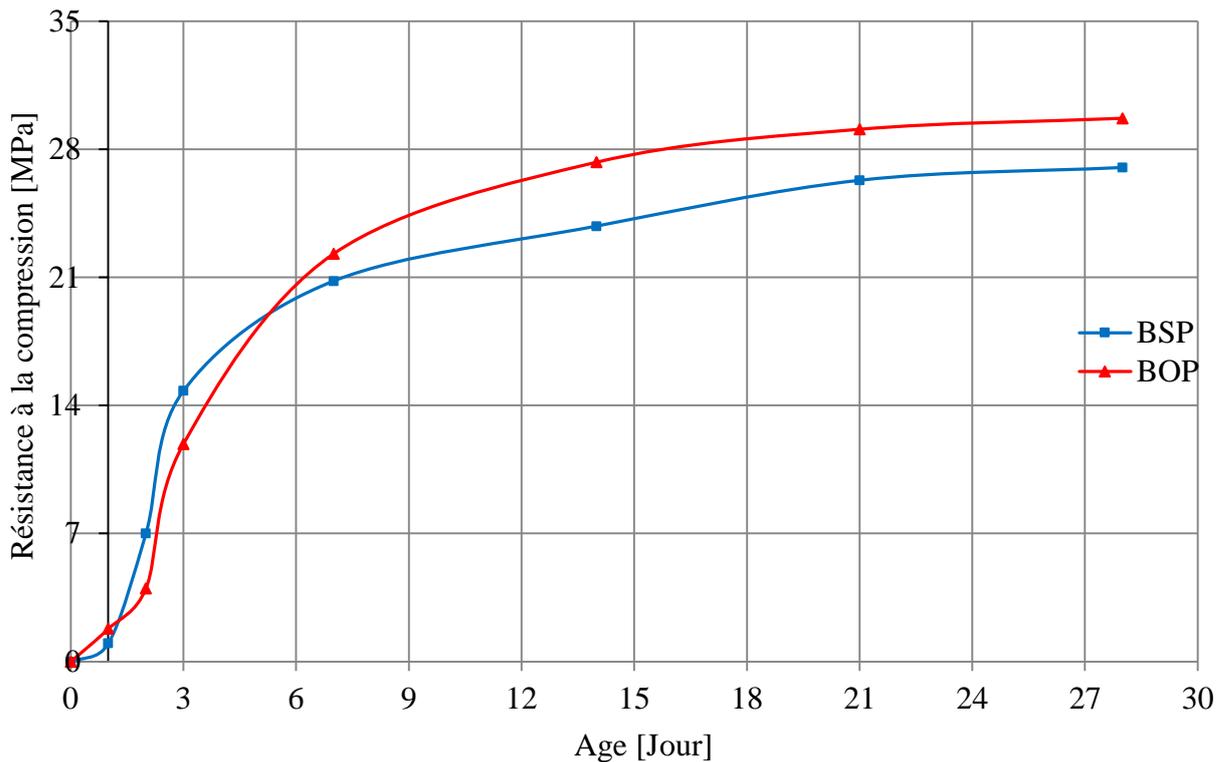


Figure 4.1 Résistance à la compression en fonction de l'âge.

La comparaison des processus de durcissement montre que l'évolution de la résistance à la compression du BSP est légèrement différente de celle du BOP.

En effet, le BSP est caractérisé par une cinétique de montée en résistance, au jeune âge, plus rapide que celle caractérisant le BOP. Cependant, avec l'avancée du processus de durcissement, les valeurs du BSP tendent à converger vers celles du BOP. A l'âge de 2 jours, la résistance à la compression du BSP atteint 7 MPa, soit 75% plus élevée que celle du BOP au même âge. A l'âge de 3 jours, la résistance du BSP n'est que de 24% plus élevée que celle du BOP. Il est intéressant de noter que les résistances à 7 et 28 jours (20,8 MPa et 27 MPa) sont supérieures aux valeurs minimales (17 MPa à 7 jours et 25 MPa à 28 jours) recommandées par l'AFTES (1996) pour les bétons projetés.

Par ailleurs, la résistance du BSP à 3 jours représente 54,8% de celle mesurée à 28 jours, en raison, probablement, d'une cinétique d'hydratation rapide. Alors qu'au même âge, la résistance du BOP ne représente que 39% de la valeur relevée à 28 jours.

Au-delà du 5^{ème} jour, la cinétique de développement de la résistance à la compression du BSP devient progressivement plus faible que celle du BOP.

La différence de résistance à la compression, au jeune âge, entre les deux mélanges, trouve son explication dans un processus de séchage du BSP plus rapide que celui du BOP. Ceci se traduit par une cinétique d'hydratation plus élevée et donc un gain en résistance plus sensible.

A l'instar de Joudi-Bahri et al. (2012) et Makhloufi et al. (2012), nous pensons que les fillers calcaires ont un effet accélérateur sur l'hydratation au jeune âge, conduisant donc à une résistance à la compression plus élevée, dû au fait que les particules fines du filler calcaire réagissent avec le C_3A du ciment, pour former les monocarboaluminates de calcium. Cela contribue à densifier la matrice du BSP, conduisant ainsi à une résistance à la compression plus élevée. La résistance élevée au jeune âge du BSP est d'un grand intérêt car elle permet un cycle de travail plus court.

Généralement, le procédé de projection par voie humide offre une résistance à la compression inférieure à celle de la projection par voie sèche, en raison de la demande élevée en eau pour un rapport E/C donné, comme stipulé par Gordon (1995). Cependant, la faible différence de résistance à la compression entre le BSP et le BOP mesurée est due, non seulement, à un rapport E /Liant du BSP plus faible que celui du BOP, mais aussi à l'utilisation simultanée du superplastifiant et du filler calcaire dans le BSP.

L'ajout de 50 kg/m^3 de fibres métalliques aux BSP et BOP augmente la résistance à 28 jours de 9 et 5%, respectivement. Ceci est en accord avec les résultats rapportés dans la littérature par de nombreux chercheurs, à l'instar de Gordon (1995) et Robins (1995).

Quant aux fibres polypropylène, elles entraînent généralement des baisses de résistance à la compression. A titre d'exemple, Morgan cité par Goudier (2001) a montré que 6 kg/m^3 de fibres en polypropylène réduisent la résistance à la compression du béton projeté par V.H de 16%. C'est la raison pour laquelle, nous n'avons pas jugé utile d'analyser leur effet sur le BSP, ceci nonobstant le coût particulièrement élevé de ces fibres par rapport aux fibres métalliques.

4.2 Résistance à la traction

Les carottes sont extraites dans la tranche (perpendiculairement au sens de la projection dans les caisses normalisées d'épaisseur 20 cm, en raison de l'orientation privilégiée des fibres.

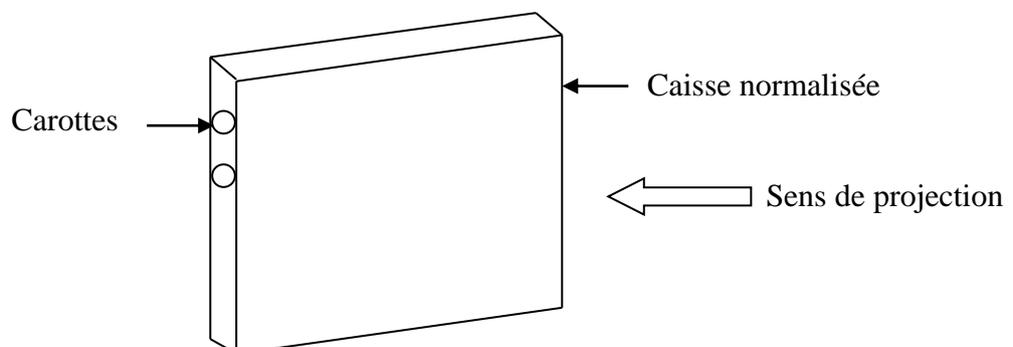


Figure 4.2 Sens de prélèvement des carottes.

Les résultats obtenus sur les BSP, BOP et les formulations sans fibres (BSP* et BOP*) sont représentés par la figure 4.3.

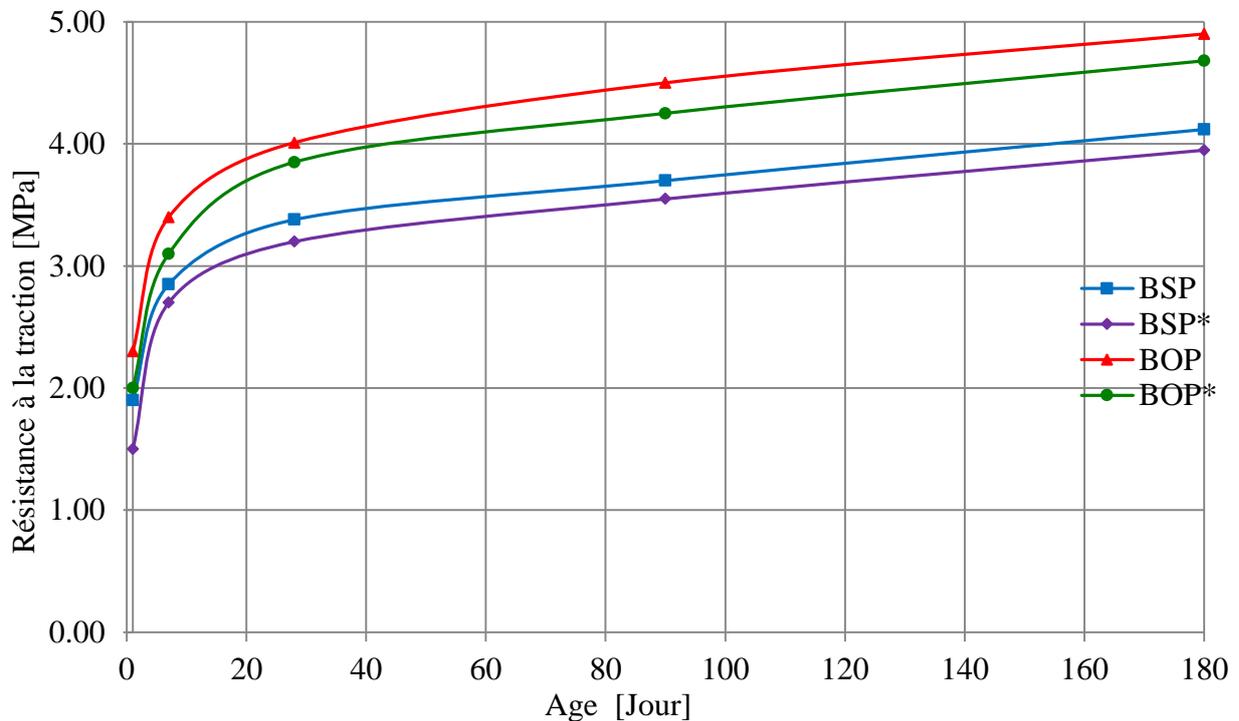


Figure 4.3 Evolution de la résistance en traction du béton projeté.

La résistance en traction par fendage à 28 jours donne les valeurs moyennes suivantes : 3,38 MPa pour le BSP projeté par VH et 4,1 MPa pour le BOP projeté par VS.

Le BOP présente donc une résistance en traction par fendage supérieure à celle du BSP. Nous ne pouvons dire, au vu des essais réalisés, si cette différence est liée aux compositions des mélanges, à la méthode de projection elle-même (VS ou VH) ou à la combinaison des deux. Cependant, les quelques études menées dans le cadre des associations de développement des mortiers et bétons projetés [ASQUAPRO, 2005 ; ASA, 2003] concluent que la projection par VS donne systématiquement des résistances en traction plus élevées que la projection par VH. La figure 4.3 montre que l'évolution des résistances à la traction suit des courbes régulières pour les deux types de béton, avec et sans fibres.

Par ailleurs, les mesures relevées à 28 jours sur les mêmes mélanges non fibrés, ont donné des valeurs très peu différentes de celles mesurées sur les bétons fibrés, les valeurs enregistrées étaient de 3,2 MPa pour le BSP et 3,9 MPa pour le BOP.

Par conséquent, on peut affirmer que les fibres n'ont que peu d'effet sur la résistance à la traction.

Par ailleurs, la résistance à la traction peut être améliorée par l'ajout de polymère en poudre comme le stipule HUA et al. (1995). Selon l'auteur, ces polymères ont la faculté de densifier l'auréole de transition, c'est-à-dire le zone de contact entre les grains de sable et la pâte de ciment.

4.3 Module d'élasticité

La mesure du module de Young est un essai peu utilisé, d'où des insuffisances de références sur les valeurs admissibles pour cette grandeur. Par conséquent, Nous nous sommes contentés de relever les mesures sur trois éprouvettes à 28 jours. On a trouvé 24 000 MPa pour le BSP et 29 000 MPa pour le BOP.

La faible dispersion des valeurs du BSP (8%) dénote d'une certaine homogénéité de la qualité du béton. Alors que dans le cas du BOP, la dispersion était de 17%. Cette homogénéité est à relier, comme précédemment souligné, non seulement à la finesse du matériau mais aussi à la voie humide utilisée pour sa projection.

La valeur du module d'élasticité plus faible du BSP implique une plus grande déformabilité et donc une moindre fissurabilité en raison d'une fragilité atténuée, comparée au BOP.

Le caractère peu fissurant du béton de sable projeté a été aussi montré pour le béton de sable vibré dans les travaux de Benaïssa et al. (1993).

4.4 Essai de flexion

Faute de pouvoir disposer d'un banc d'essai pour procéder à des essais sur les panneaux eux-mêmes, nous nous sommes contentés d'essais 3 points sur poutre 7 x 7 x 28 cm³

Chaque mesure représente la moyenne de 3 essais sur éprouvettes menés conformément à la norme NF P18-407. Les résultats sont illustrés par la figure 4.4.

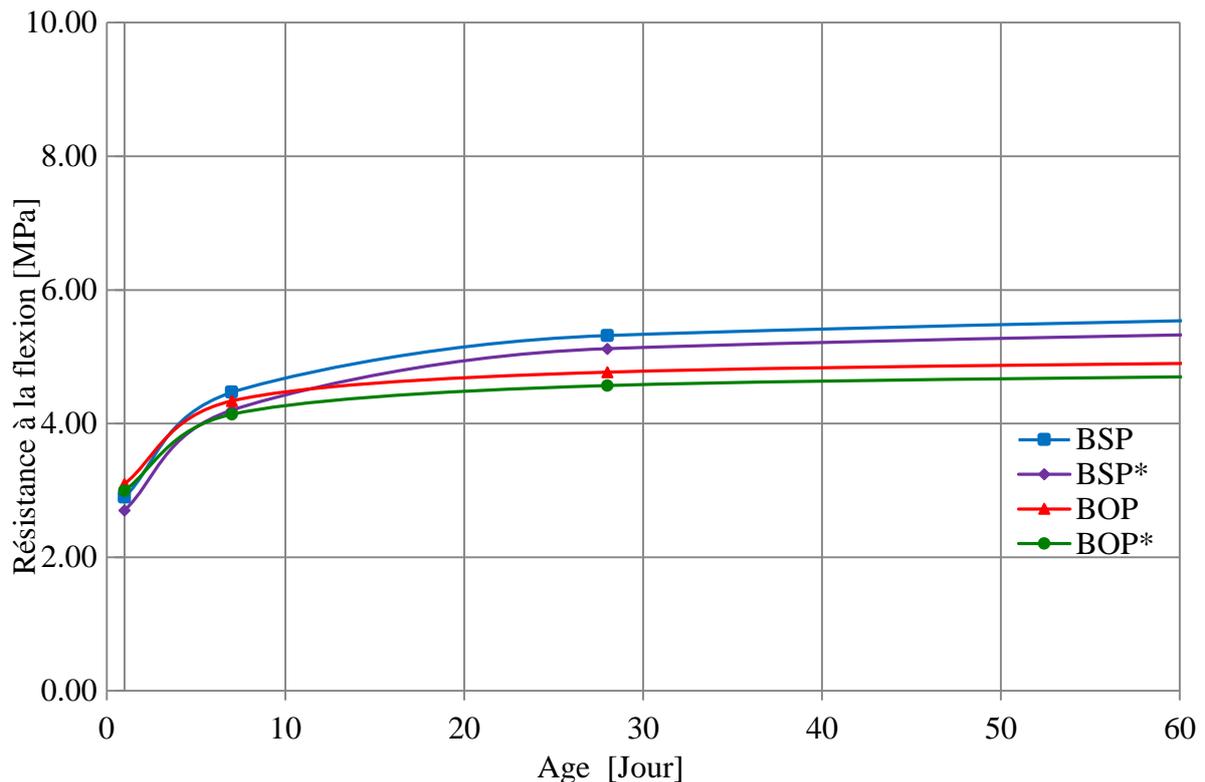


Figure 4.4 Flexion en fonction de l'âge [jours].

Les courbes des 4 mélanges présentent la même allure ; plus ou moins rapide jusqu'à 7 jours environ, puis ralentie avec une tendance à la stabilisation à partir de 28 jours. Au jeune âge, les fibres métalliques semblent n'avoir aucun effet sur la résistance. Par contre à long terme, l'incidence commence à se manifester mais de façon très modeste. Or le résultat le plus surprenant est que les résistances du BSP (avec et sans fibres) sont supérieures à celles du BOP (avec et sans fibres). Cependant, durant les 4 premiers jours, on assiste au phénomène contraire. Ce phénomène peut trouver son explication dans l'accélération de l'hydratation au jeune âge, dans le cas du BSP, comme précédemment souligné.

Analyse des résistances mécaniques

Les résistances mécaniques des bétons projetés ne diffèrent que très peu, sauf pour le module d'élasticité qui montre que le béton de sable projeté est plus déformable, et constitue donc un facteur positif vis-à-vis de la fissuration. Ce qui corrobore l'analyse visuelle des parements qui a mis en relief le caractère peu fissurant de BSP. La compacité du BSP présente une valeur supérieure à celle du BOP, de l'ordre de 6,40%, ce qui n'est pas à sous estimer dans la technique de projection. Ce résultat autorise l'utilisation du BSP dans les ouvrages modérément sollicités comme le préconise Benaïssa et al. (2008).

La résistance à la compression du BSP est légèrement plus élevée que celle du BO durant les 5 premiers jours ; puis les cinétiques tendent à converger à long terme.

Notons aussi que les fibres métalliques n'ont que peu d'effet sur les résistances en traction et en flexion. Quant à la résistance en traction, on note une différence de l'ordre de 15% en faveur du BOP. Par contre, en flexion, le BSP développe une amplitude légèrement plus grande que celle du BOP.

4.5 Retrait endogène [ϵ_{RE}]

Les retraits endogènes des bétons (BSP, BOP et BV) sont illustrés par la figure 4.5. Chaque valeur constitue la moyenne de trois tests. Pour une meilleure approche de l'évaluation du retrait endogène du BSP, nous avons procédé à une étude comparative avec le béton ordinaire projeté mais aussi avec le béton ordinaire vibré.

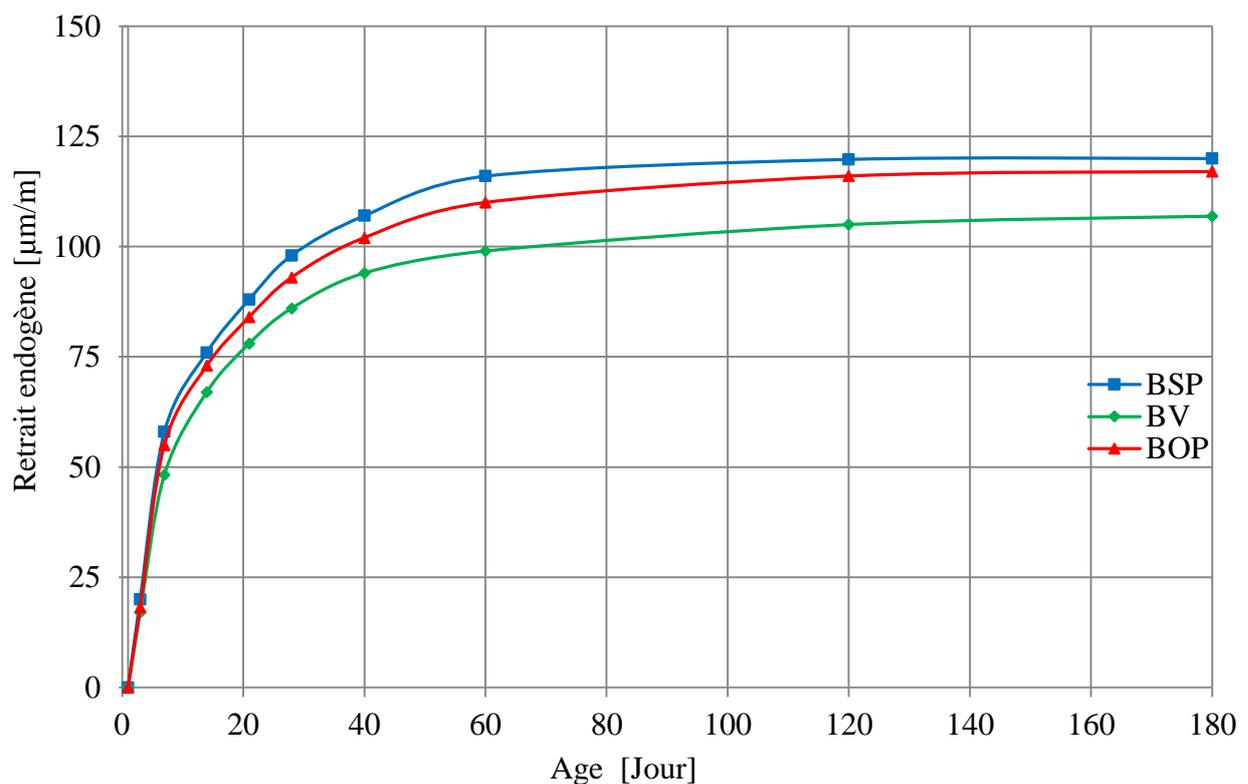


Figure 4.5 Retrait endogène en fonction du temps.

Les courbes de la figure montrent que les cinétiques du retrait endogène des trois mélanges sont similaires. 50% de la déformation obtenue à 180 jours, est atteinte durant les deux premières semaines. Au-delà de cette période, on assiste à une diminution de la cinétique de développement de la déformation, et ce pour les trois bétons.

Le développement rapide de ϵ_{RE} au jeune âge ne peut s'expliquer que par un processus d'hydratation rapide des mélanges. La lecture des courbes montre aussi que pour les trois mélanges, la déformation du retrait endogène s'arrête de se développer pratiquement en deçà de 75 jours, en raison certainement de la stabilisation de l'évolution de l'hydratation.

A long terme, l'amplitude de ϵ_{RE} du BSP est 10% plus élevée que celle du BV, alors que celle du BOP, est quasi similaire à celle du BSP. Ceci indique clairement, qu'en équilibre hydrique, les volumes d'hydrates formés dans les 3 mélanges sont sensiblement les mêmes. L'explication à cela est à mettre sur le faible écart entre les rapports E/C des mélanges. Notons que les travaux menés sur différents types de bétons et que rapporte la littérature, mettent en exergue le fait que le rapport E/C joue un rôle déterminant dans le retrait endogène, aussi bien, vis-à-vis de l'amplitude que de la cinétique.

Cependant, on aurait pu s'attendre à un retrait endogène plus important dans le cas du BSP à cause du volume de pâte plus important, mais il n'en est rien. Ce facteur défavorable semble être compensé par la finesse du filler calcaire et le dosage approprié qui impliquent une réduction de la porosité et donc une déformation moindre.

4.6 Retrait de dessiccation

A l'instar du retrait endogène, le retrait de dessiccation du BSP a été comparé aussi bien à celui du béton vibré (BV) qu'à celui du béton ordinaire projeté (BOP).

Les résultats des tests du retrait de séchage [ϵ_{RS}] des deux mélanges (BSP et BV) sont présentés dans la figure 4.6. Trois échantillons ont été testés pour obtenir la valeur moyenne. Le retrait de séchage a été obtenu en déduisant le retrait endogène du retrait total.

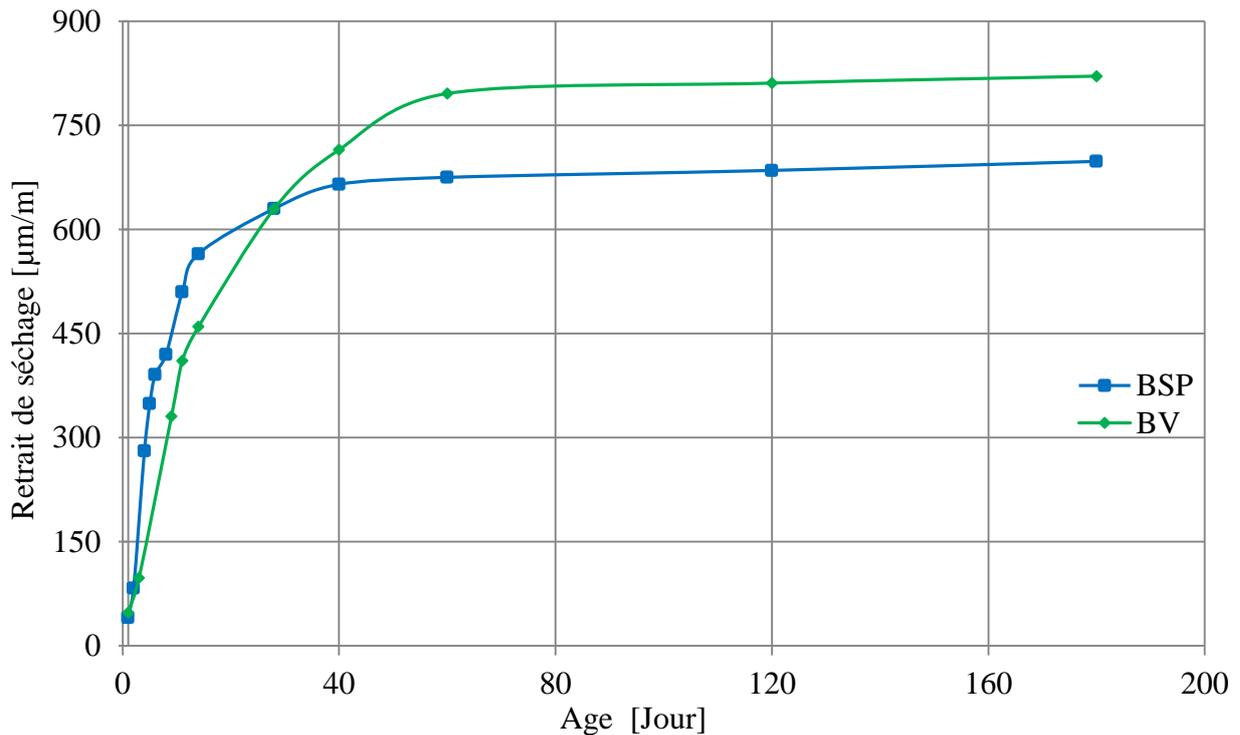


Figure 4.6 Retrait de dessiccation en fonction de l'âge.

4.7 Analyse comparative de la cinétique du BSP avec celle du BV

On peut constater que la cinétique du retrait de séchage du BSP [$\epsilon_{RS,BSP}$] est très rapide au jeune âge : 50% de la valeur atteinte à 180 jours a été obtenu durant les 5 premiers jours. Toutefois, pour le BV, le même taux de ϵ_{RS} [$\epsilon_{RS,BV}$] a été atteint à 11 jours. Par conséquent, la stabilisation de $\epsilon_{RS,BSP}$ se produit plus rapidement que celle de $\epsilon_{RS,BV}$.

$\epsilon_{RS,BSP}$ est 15% plus élevé que $\epsilon_{RS,BV}$ pendant les 4 premières semaines, mais au-delà de cet âge, $\epsilon_{RS,BSP}$ devient inférieur à $\epsilon_{RS,BV}$.

La valeur obtenue à 180 jours (698 $\mu\text{m}/\text{m}$) ne diffère pas significativement de la majorité des résultats d'essais, obtenus sur béton projeté avec des granulats 8/10 mm.

Hills (1982), trouve des valeurs de 450 à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 6 mois d'âge pour un béton projeté par V.S. Benaissa et al. (2008) ont montré que, pour un béton projeté par V.S, le retrait de séchage atteint la valeur de 620 $\mu\text{m}/\text{m}$ au bout de 180 jours d'âge. La même étude a également montré que le ϵ_{RS} du béton de sable appliqué par V.H était de 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ à l'âge de 6 mois. Cependant, Wolsiefer et Morgan (1993) ont montré que ϵ_{RS} du béton projeté est dans la plage de 1000-1100 $\mu\text{m}/\text{m}$, c'est-à-dire 15% supérieur à celui du béton ordinaire.

La cinétique particulière de $\epsilon_{RS,BSP}$, qui est très rapide au jeune âge, comme indiqué précédemment, peut être expliquée par la perte de poids des prismes de retrait dû à l'évaporation de l'humidité du corps de l'échantillon.

A noter que les mesures de retrait effectuées sur les éprouvettes de BSP relatent fidèlement les déformations grâce à l'absence de fissures. Par contre, dans le cas du BOP, les mesures de retrait relevées sont sous estimées par l'ouverture des fissures.

La figure 4.7 montre la variation du changement de poids du BSP et BV.

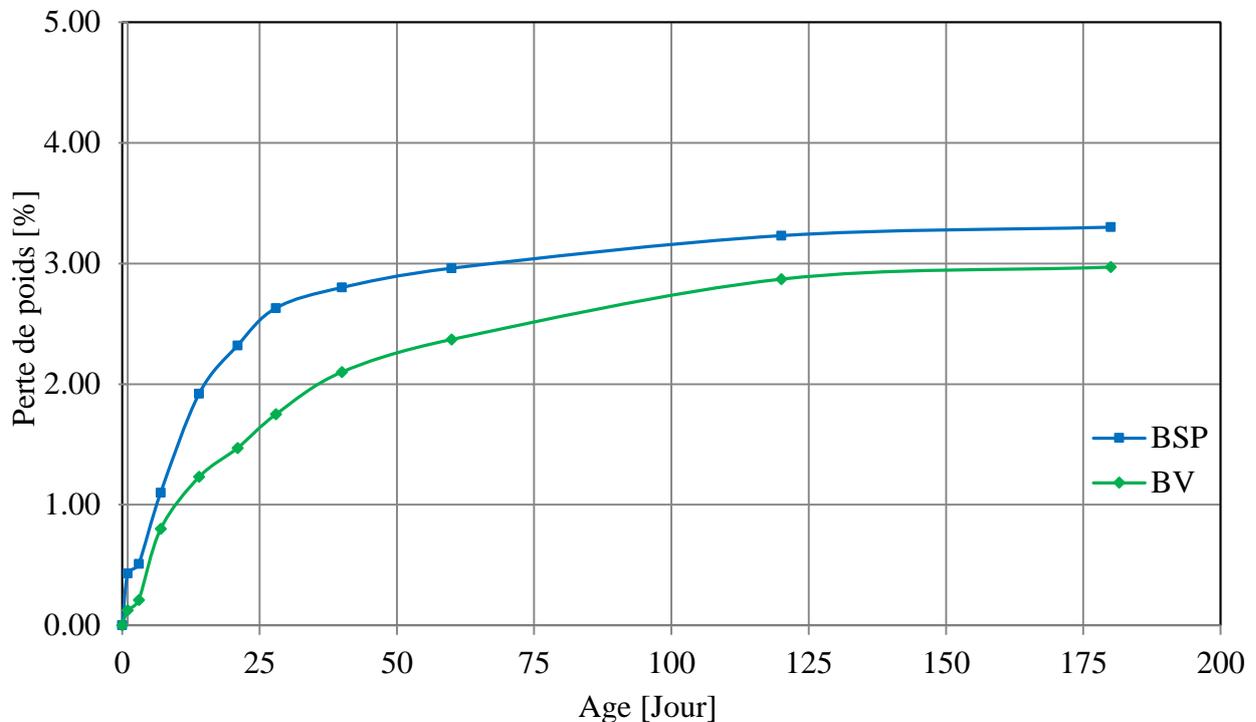


Figure 4.7 Perte de poids en fonction de l'âge.

Les courbes de cette figure montrent que la perte en poids du BSP est très rapide au jeune âge, par rapport au BV. 50% de la valeur finale du BSP obtenue à 180 jours est atteinte au bout de 12 jours seulement. Toutefois, pour le BV, le même taux de séchage n'a été atteint qu'au bout de 28 jours.

Le BSP perd plus d'eau pendant la période de mesure du retrait que le BV, avec, néanmoins, une amplitude de déformation plus faible au-delà de 28 jours. Ce résultat inattendu indique que le taux élevé de séchage ne découle pas nécessairement sur une amplitude de retrait plus importante. Ce résultat est en accord avec les conclusions de Collins et Sanjayan (2000); mais en opposition avec la majorité des résultats rapportés dans la littérature.

En outre, bien que le volume de pâte du BSP soit plus important que celui du BV, l'amplitude de déformation du BSP, au-delà de 28 jours, est moins importante que celle du BV. Ce résultat est aussi en contradiction avec ceux de la littérature. Nous pensons que l'effet négatif de la pâte sur ϵ_{RS} dans le BSP est certainement compensé par l'utilisation de fillers calcaires

qui, comme rapporté par Bentz et al. (2009), pourraient fournir une réduction substantielle de ϵ_{RS} .

Cette hausse de cinétique de séchage du BSP trouve son origine dans le degré élevé de connectivité des pores. Cette hypothèse est confirmée par les essais de perméabilité qui montrent que la perméabilité du BSP, qui nécessite 5,7 MPa pour un drainage à 24 heures, est inférieure à celle du BV, qui nécessite 7,2 MPa à la même échéance. Baroghel et al. (2004) ont démontré que la perméabilité augmente notamment avec le degré de connectivité des pores.

Wittman (1982), Collins et Sanjayan (2000) montrent que la répartition des tailles des pores a une influence déterminante sur l'ampleur du retrait de séchage. Dans ce contexte, la prosimétrie au mercure peut s'avérer utile dans la compréhension de ce phénomène. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons analysé au prosimètre à mercure, deux échantillons de BSP et BV.

A noter que la porosité accessible à l'eau du BSP est de 22% contre 27% pour le BOP et 16% pour le BV. Gérôme (2003) trouve, pour des bétons de sable coulés, des valeurs s'échelonnant entre 18 et 20%. La différence reste donc insignifiante, alors qu'on aurait pu s'attendre à une différence bien plus grande, comme c'est le cas dans le BOP.

4.8 Effet de la répartition des tailles des pores

Comme on peut le voir à travers les figures 4.8 et 4.9, la structure porométrique du BSP est de type monomodal avec un seul pic correspondant aux mésopores. Le BV, quant à lui, présente une structure bimodale avec 2 pics : l'un correspond aux mésopores et le second aux macropores.

La distribution porométrique met en évidence le taux relativement réduit des micropores, aussi bien dans le BSP que dans le BV. La classification prise en compte dans la catégorisation des pores est celle de l'International Union of Pure and Applied Chemistry « IUPAC System » (1972).

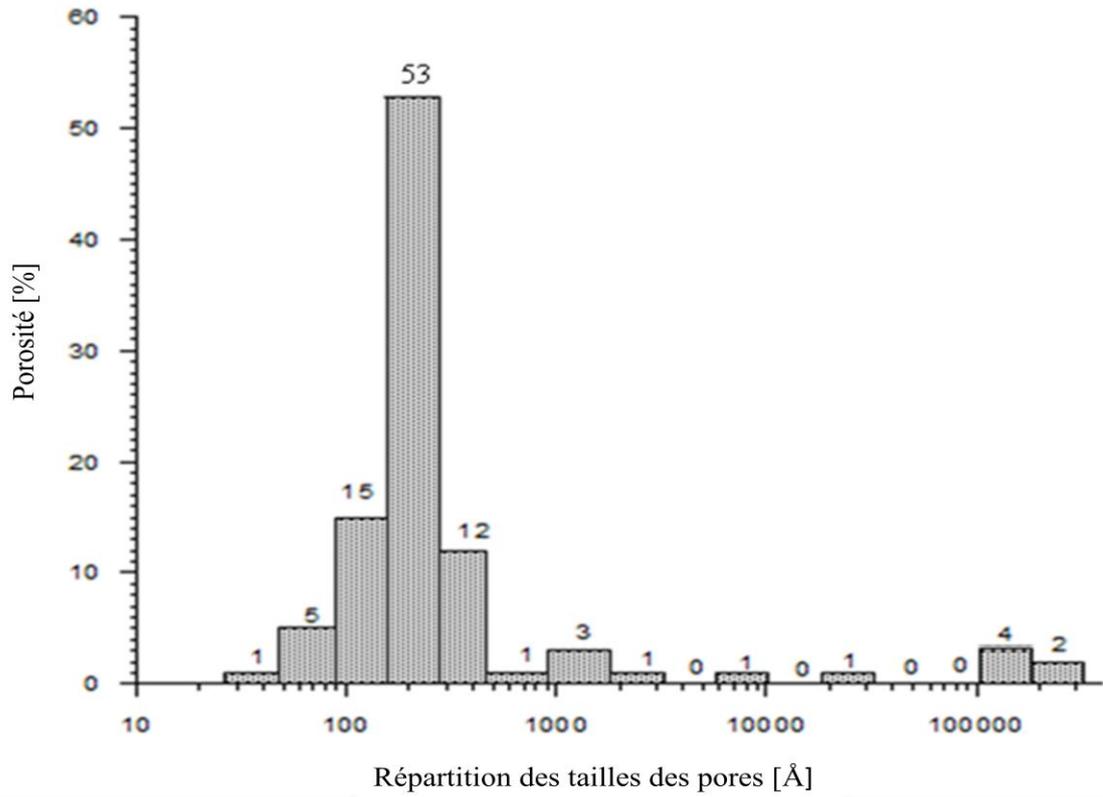


Figure 4.8 Répartition des tailles des pores du BSP.

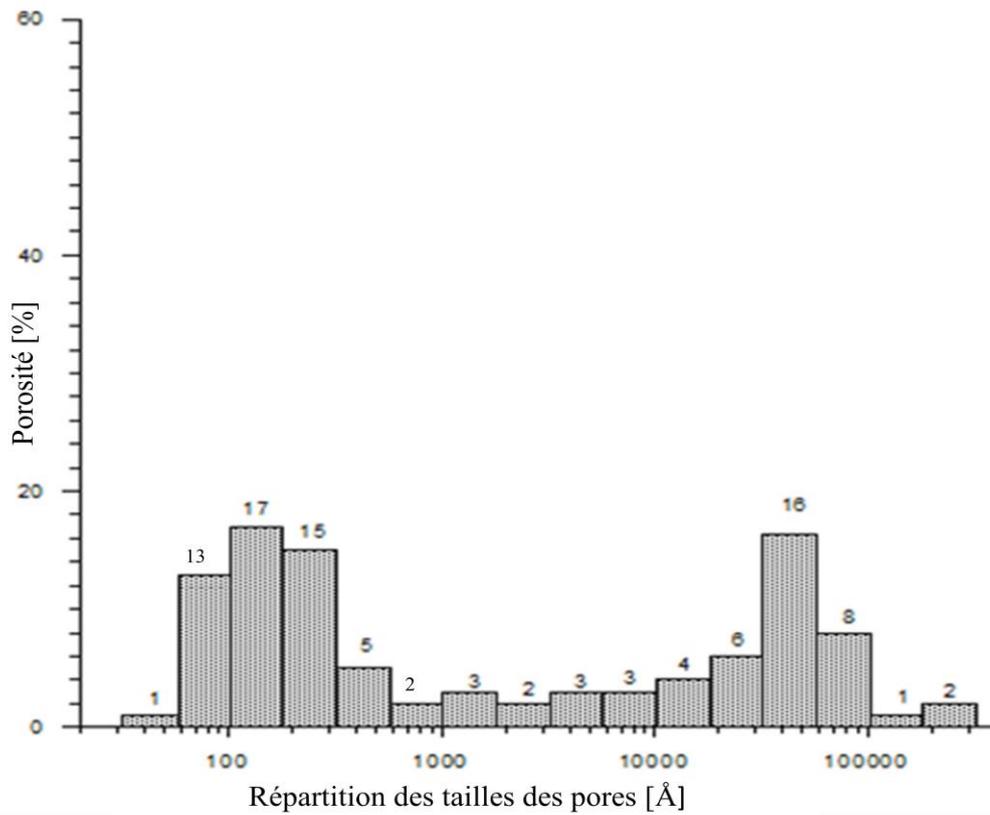


Figure 4.9 Répartition des tailles des pores du BV.

Par ailleurs, le pourcentage de mésopores caractérisant le BSP est plus élevé que celui du BV (80% contre 40%). Le volume élevé de mésopores et la faible proportion de macropores (15%) du BSP indiquent clairement que la structure de celui-ci est fine. Ceci peut trouver son explication dans la grande quantité de filler qui contribue à une réduction de diamètres des pores. De plus, la formation de monocarboaluminate due à la réaction chimique entre les fillers calcaires et l'aluminate tricalcique (C_3A) du ciment a pour conséquence de densifier la matrice, comme précédemment souligné. Cet effet des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment est confirmé par Kadri et al. (2009) et Damtoft et al. (1999).

Par conséquent, il se produit une augmentation de la proportion de mésopores et une réduction des macropores. Ceci peut s'expliquer de la manière suivante: Avec la progression de l'hydratation, les macropores sont progressivement envahis par les nouveaux produits d'hydratation, rendant la structure plus fine. L'autre résultat surprenant et inattendu est que le BSP avec 80% de mésopores perd plus d'eau par évaporation que le BV caractérisé par une structure bimodale avec 40% de macropores et 35% de mésopores. Ce phénomène est dû au fait que le BSP formulé sans grosses inclusions, présente certainement des pores plus orientés avec un grand degré de connectivité. Alors que dans le BV, les grosses inclusions additionnées aux deux familles de pores, contribuent à réduire le degré de connectivité des pores et donc à augmenter la tortuosité de ceux-ci.

Cette structure particulière du BSP est sans doute à l'origine de la différence du comportement au retrait des deux bétons (BSP et BV).

Au jeune âge, les macropores du BV exercent une pression sur les mésopores, rendant l'évaporation de l'eau de ces derniers difficile. Le processus de dessiccation du BV passe donc par deux phases: une macrodiffusion suivie d'une mésodiffusion. Ceci constitue une hypothèse que nous émettons car il n'est pas toujours aisé de raisonner à l'échelle de l'infiniment petit.

La conséquence à cela est que la dessiccation affecte plus rapidement les mésopores du BSP que ceux du BV. En d'autres termes, au jeune âge, les mésopores du BSP et les macropores du BV sont soumis simultanément au séchage. Ce phénomène conduit à une contraction importante des pores du BSP et une contraction plus faible dans le cas du BV. La figure 4.7 montre que la chute en poids du BSP est plus importante que celle du BV, due à une évaporation hydrique plus prononcée.

Avec la progression de l'hydratation dans le BV, la quantité d'eau dans les macropores devient plus faible, alors que les mésopores conservent l'essentiel de leur eau au jeune âge. Tandis que les mésopores du BSP sont partiellement remplis d'eau, pour les raisons citées

précédemment. L'eau exerce alors de grandes pressions sur les parois des mésopores du BSP et de faibles pressions sur celles des mésopores du BV. Ceci découle sur des contractions des mésopores du BV plus importantes en amplitude que celles affectant les mésopores du BSP. Par conséquent, le retrait induit dans le BSP devient plus petit que celui induit dans le BV.

Nous pouvons donc conclure que le retrait de dessiccation du BSP est, au jeune âge, plus important que celui du BV. Dans une seconde phase, l'amplitude du retrait de dessiccation du BSP devient moins prononcée que celle du BV, en dépit du fait que le BSP continue à perdre plus d'eau par évaporation que le BV.

Finalement, la déformation du retrait de dessiccation semble dépendre, non seulement, du taux de séchage mais aussi de la porométrie du matériau et notamment la proportion de mésopores.

4.9 Analyse comparative des retraits de dessiccation des BSP et BOP

Les résultats des mesures du retrait des deux matériaux sont illustrés par la figure 4.10.

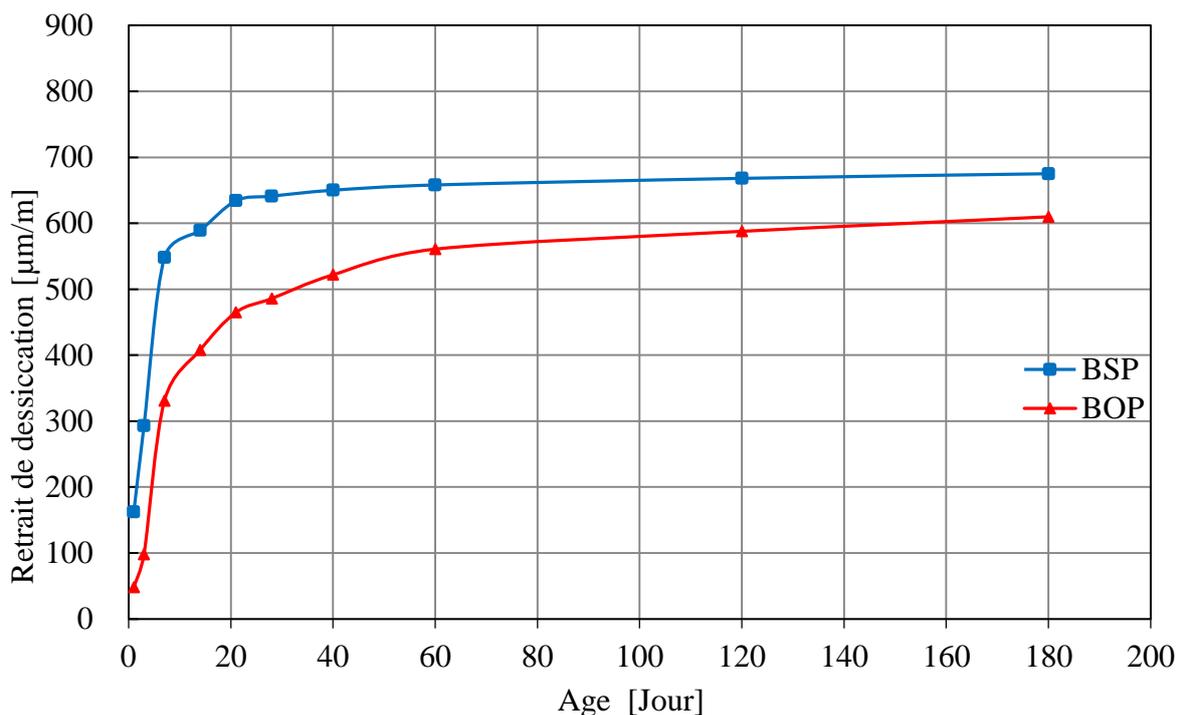


Figure 4.10 Retrait de dessiccation des BSP et BOP en fonction de l'âge.

Les courbes de la figure mettent en évidence une cinétique particulièrement rapide du BSP. A 3 jours d'âge, on enregistre une déformation représentant 43% de celle relevée à 180 jours, qui est de 675 $\mu\text{m/m}$. Alors que le BOP n'atteint un taux de déformation de 50% par rapport à la valeur mesurée à 180 jours, qu'à 6 jours seulement. Au bout de 24 heures, le BSP développe une déformation de retrait plus élevée de 63% par rapport à celle du BOP. Ce

développement rapide de la cinétique de retrait dû à une cinétique de séchage rapide du BSP nécessite une attention particulière durant cette phase, afin d'éviter la microfissuration. Des méthodes de cures appropriées peuvent palier ce phénomène.

A long terme, le retrait du BSP n'est que de 10% plus élevé que celui du BOP. Cette différence peut être considérée comme insignifiante étant donné la dispersion des résultats (8%) et la différence des volumes de pâtes (345 l/m^3 pour le BSP vs 363 l/m^3 pour le BOP).

Les valeurs du retrait de dessiccation de l'ordre de $675 \text{ }\mu\text{m/m}$ et $610 \text{ }\mu\text{m/m}$ pour, respectivement, le BSP et le BOP, obtenues à 180 jours ne diffèrent pas de beaucoup de la majorité des résultats de la littérature.

4.10 Effet des fibres métalliques [FM] sur le retrait de dessiccation

Les résultats obtenus sur les formulations des bétons projetés avec et sans fibres sont illustrés par la figure 4.11.

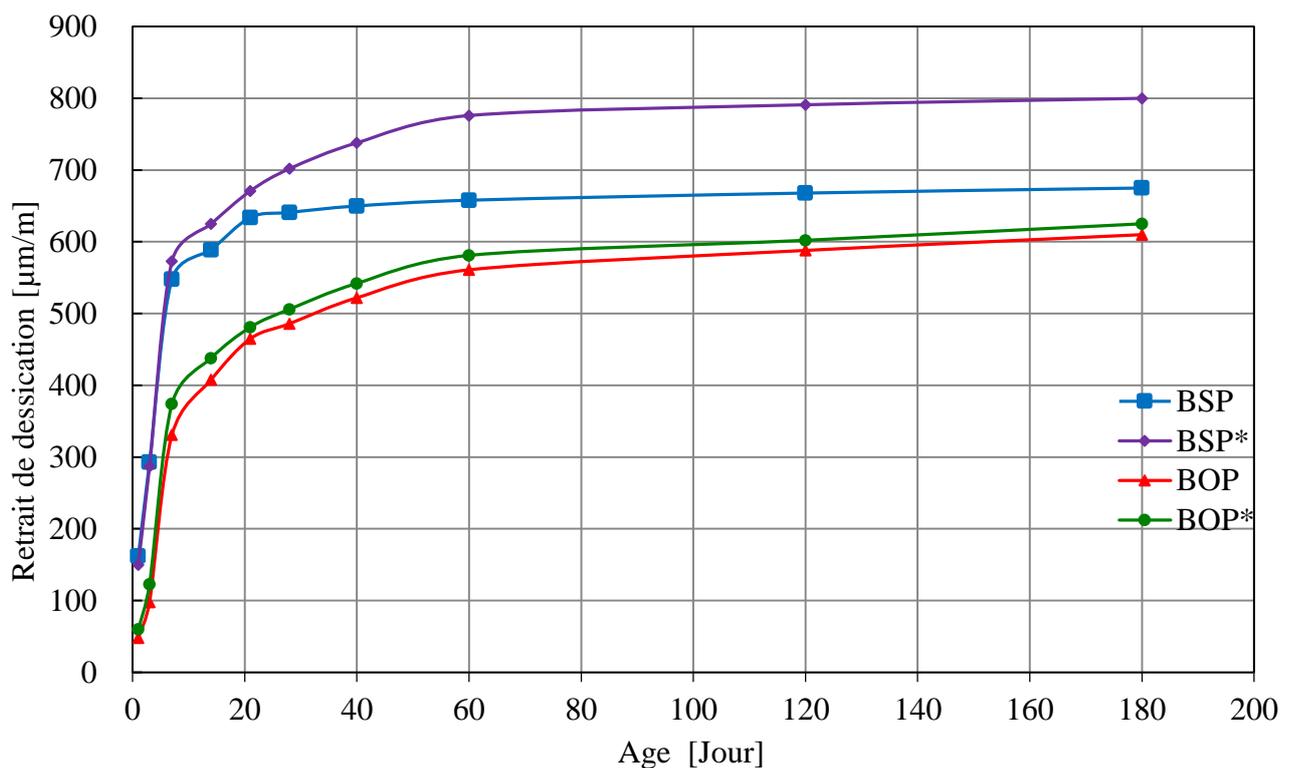


Figure 4.11 Retrait de dessiccation en fonction de l'âge.

Les courbes montrent que les FM n'ont aucun effet sur l'évolution des déformations du BOP, ce qui est en contradiction avec la majorité des résultats de la littérature. Cependant, l'effet des FM dans la réduction du retrait du BSP est évident du moment que le même mélange mais sans FM, noté BSP*, développe une déformation de $790 \text{ }\mu\text{m/m}$, soit 16% plus élevée que celle du BSP (avec FM). Malmberg (1977) a montré que les FM réduisent systématiquement le

retrait de dessiccation. Cependant, Austin et Robins (1995) n'observent aucun effet des FM sur le béton ordinaire projeté. Il se trouve que, malheureusement, les résultats concernant le béton de sable fibré projeté sont inexistant, d'où des difficultés pour situer convenablement les résultats de nos tests sur le BSP.

Une des raisons de l'effet notable des FM sur le retrait du BSP est le dosage important en FM du béton de sable en place sur le support, soit 45 kg/m^3 , alors que celui du BOP n'est que de 36 kg/m^3 . Par ailleurs, les FM semblent agir comme des inclusions de type agrégats dans le BSP dont les inclusions sont limitées en volume, conduisant ainsi à une atténuation du retrait. De plus, comme le stipule Zellers (2004), les FM se comportent mieux dans le béton projeté par voie humide que dans le béton projeté par voie sèche. Or, justement, le BSP est mis en place par voie humide. Il est évident que les mécanismes d'action des fibres métalliques ne peuvent être strictement identifiés étant donné les interactions complexes entre les caractéristiques et le volume des FM d'une part et le volume de pâte et la technique de projection d'autre part.

4.11 Retrait endogène vs retrait de séchage

4.11.1 Retrait total

L'évolution des retraits totaux des bétons de sable projeté et vibré est illustrée par la figure 4.12.

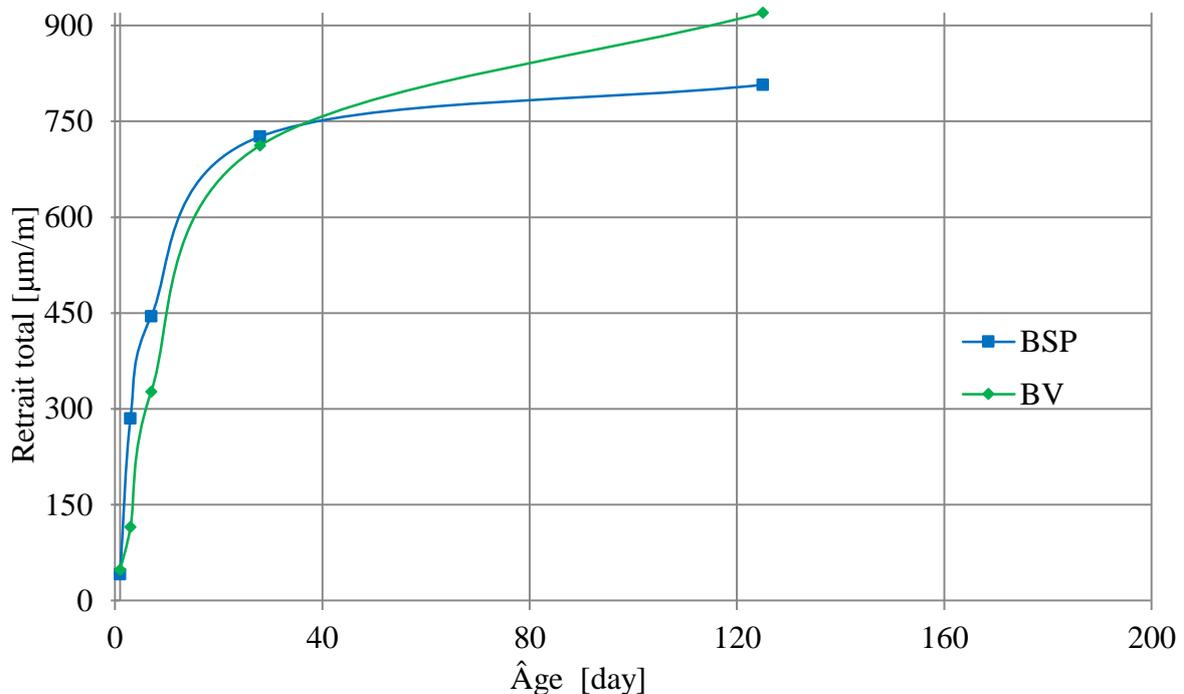


Figure 4.12 Retrait total des BSP et BV en fonction de l'âge.

En conditions de séchage, le retrait de dessiccation se développe simultanément avec le retrait endogène. Cependant, dans le processus de dessiccation, l'amplitude du retrait endogène est moins développée que celle que l'on enregistre dans les conditions d'équilibre hydrométrique, en raison de l'hydratation retardée due au départ de l'eau du corps de l'éprouvette vers l'extérieur. En négligeant ce phénomène, il s'en suit une surestimation de la part du retrait endogène dans l'estimation du retrait total. De ce fait, la détermination de l'influence du processus de séchage sur le retrait endogène semble très complexe.

La figure 4.12 montre que la cinétique du retrait total (retrait endogène + retrait de dessiccation) des deux bétons (BSP et BV) est similaire à celle du retrait de dessiccation.

La différence entre les magnitudes du retrait total des BSP et BV ne diffère pas de beaucoup de celle observée entre les magnitudes du retrait de dessiccation des deux bétons. Ceci s'explique par la faible différence mesurée entre les déformations du retrait endogène des BSP et BV.

4.11.2 Analyse comparative entre les retraits endogène et de dessiccation

A 3 jours d'âge, les retraits endogènes des BSP et BV (figure 4.5) représentent 7 et 14,7% de la déformation du retrait total (figure 4.12), respectivement.

A 125 jours d'âge, ces taux passent à 14,8 et 11,6%, pour le BSP et le BV, respectivement. Par conséquent, le retrait endogène semble constituer un facteur non significatif par rapport au retrait de dessiccation. La fraction la plus importante du retrait total est constituée donc par le retrait de dessiccation. En effet, le rapport du retrait de dessiccation/retrait total des BSP et BV, à 125 jours d'âge, est égal à 85,2 et 88,4%, respectivement.

Cette faible contribution du retrait endogène dans la détermination du retrait total s'explique par le rapport élevé de E/C. Par contre, dans le cas des bétons à haute performance dont les rapports E/C sont inférieurs à 0,35, le retrait endogène constitue la part prédominante dans le retrait total. Ce phénomène peut trouver son explication dans le fait que l'humidité relative interne au béton pourrait être inférieure à l'humidité relative de l'environnement. Le retrait endogène est donc une fonction croissante du rapport E/C. cette hypothèse est en accord avec les conclusions de Zhang et al. (2003), Tazawa et Miyazawa (1993) et Brooks et al. (1998).

Conclusion

Il a été mis en évidence, des retraits endogènes similaires pour les trois bétons d'essais (BSP, BOP et BV). Seul le rapport E/C semble jouer un rôle prépondérant dans cette déformation d'auto-dessiccation.

Par ailleurs, un volume plus important en pâte de ciment ne conduit pas obligatoirement à un retrait plus important.

L'amplitude du retrait de dessiccation du BSP est plus prononcée que celle du BV durant les 4 premières semaines, puis devient plus faible ; et ce en dépit du fait que le BSP continue à perdre plus d'eau que le BV. Par conséquent, la déformation du retrait de dessiccation n'est pas une fonction croissante de la perte en poids comme l'affirme certains chercheurs.

La proportion de mesopores semble jouer un rôle décisif dans la cinétique de séchage et donc dans l'amplitude et la cinétique de retrait de dessiccation. Le degré de tortuosité des pores a aussi une incidence certaine sur l'amplitude de déformation du retrait de dessiccation.

A long terme, le retrait du BSP n'est que de 10% supérieur à celui du BOP, avec cependant une cinétique plus prononcée au jeune âge.

Si l'impact des fibres métalliques semble assez sensible dans le cas du retrait de dessiccation du BSP, il n'en est rien dans le cas du BOP.

Par ailleurs, les fibres métalliques semblent n'avoir aucun effet notable sur les résistances mécaniques, y compris la flexion.

**CONCLUSION
GENERALE**

CONCLUSION GENERALE

Contexte de la thèse

Le béton projeté est utilisé dans le domaine des travaux souterrains et de soutènement (tunnels), la réparation et le renforcement d'ouvrages.

Cependant, en Algérie, il est aussi utilisé depuis quelques années dans la conception de panneaux 3D. A ce jour, le béton utilisé dans cette technique est un béton à base de granulats 3/8 mm projeté par voie sèche. Néanmoins, ce matériau présente l'inconvénient de développer des couches de béton projeté peu épaisses avec une mauvaise qualité de fini de surface. L'autre inconvénient majeur de ce béton réside dans les pertes considérables par rebond pouvant atteindre jusqu'à 40%, rebond qui ne peut être réutilisé, d'où des impacts économique et environnemental défavorables. De plus, le comportement différé de ce matériau n'est pas bien appréhendé. Dans ce contexte, une nouvelle formulation est proposée pour palier ces inconvénients.

L'objectif de ce travail a été de fournir donc une nouvelle formulation offrant un meilleur comportement aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Les informations obtenues dans cette étude ont été fournies grâce à un large corpus expérimental mené in-situ et au laboratoire. L'étude a été comparative avec le béton ordinaire projeté et utilisé dans la conception des panneaux 3D. L'évolution du retrait a été confrontée aussi à celle du béton vibré. Les bétons d'essais projetés (béton de sable et béton ordinaire) ont été pris dans leur contexte optimisé, c'est-à-dire le béton de sable mis en place par voie humide et le béton ordinaire par voie sèche.

Contribution

Nous nous sommes intéressés à la fois à la formulation du béton de sable projeté et à son comportement à l'état frais et durci en se basant, à travers l'étude comparative, sur les paramètres les plus influents.

Les résultats obtenus par le biais du corpus expérimental semblent assez percutants pour montrer que le béton de sable fibré projeté par voie humide offre de meilleures performances que le béton ordinaire projeté par voie sèche. Il s'avère, toutefois, que les analyses des résultats obtenus sur le béton de sable peuvent être incomplètes ou difficiles à mener étant donné le peu de travaux réalisés à ce jour sur ce matériau dans le domaine de la projection.

Les conclusions majeures obtenues peuvent se résumer comme suit :

- Possibilité de formuler un béton de sable fibré apte à être projeté en remplacement du béton ordinaire utilisé dans la technique de conception des panneaux 3D.

- La formulation du béton de sable qui a été mise au point présente l'avantage d'être faiblement dosée en ciment avec une quantité appréciable de fines calcaires, d'où un impact économique, environnemental et écologique favorable par rapport au béton ordinaire projeté.

Par rapport au BOP, le BSP présente les avantages suivants

- Un meilleur fini de surface.

- Une meilleure homogénéité.

- Des épaisseurs de couches de béton projeté, de l'ordre de 90 mm, donc supérieures à celles du béton traditionnel projeté qui n'atteignent que 60 mm.

- Des pertes par rebond du béton et des fibres diminuées de moitié.

- Des compositions du rebond du béton plus homogène (c'est-à-dire peu différentes du matériau en place).

- Une meilleure résistance à la compression au jeune âge.

- A long terme, la résistance à la compression est similaire à celle du béton ordinaire projeté.

- Un retrait endogène peu différent.

- Un retrait de dessiccation équivalent à long terme, avec cependant une cinétique de développement au jeune âge plus importante.

- L'amplitude du retrait de dessiccation du BSP est plus prononcée que celle du BV durant les 4 premières semaines, puis devient plus faible ; et ce en dépit du fait que le BSP continue à perdre plus d'eau que le BV. Par conséquent, la déformation du retrait de dessiccation n'est pas une fonction croissante de la perte en poids.

- Un faible dosage en fibres métalliques (50 kg/m^3) impacte favorablement le retrait de dessiccation (réduction de 16%).

- Une perte en poids plus importante n'induit pas systématiquement un retrait plus important.

Perspectives

Si nos travaux autorisent la conclusion sur nombres de questions, ils ouvrent également de nombreuses perspectives que l'on peut résumer dans ce qui suit :

Etude de l'influence des paramètres de projection sur le taux de pertes par rebond, comme par exemple la position de la lance, la distance de celle-ci par rapport au substrat, la vitesse de projection, etc.

A ce titre, un large programme sur l'incidence de la distance de la lance par rapport au plan de projection, la vitesse de projection du béton, la technique de projection (en zigzag, cercle,

colonne), a été mené par l'ASQUAPRO (2005) et l'ASA (2003). Les conclusions mettent en relief l'impact certain de ces facteurs sur, non seulement, les taux de perte par ricochet mais aussi, la qualité de parement obtenu.

Un autre paramètre important lié au type de substrat a été étudié par les deux associations précédemment citées. En effet, il a été mis en évidence que les substrats durs (roches par exemple) entraînent inévitablement des pertes de béton par ricochet plus importantes que les supports élastiques, d'où l'importance de l'envisager dans le domaine du comportement des bétons de sable projetés.

Gérôme (2003) a abordé dans son étude l'influence des raidisseurs utilisés dans le renforcement des bétons projetés. Les raidisseurs les plus utilisés semblent être les treillis soudés mais aussi les fibres. Néanmoins des études sur l'impact des fibres végétales, en bois et en polypropylène doivent faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Une autre perspective qui s'ouvre en matière d'étude, c'est l'évolution de la porosimétrie en fonction de la progression de l'hydratation et son influence sur l'évolution du retrait.

Il serait aussi judicieux d'envisager une étude sur l'influence des caractéristiques géométriques et mécaniques des fibres de différentes natures sur la résistance à la compression, la traction, la flexion et le retrait.

Enfin pour compléter les connaissances sur le béton ordinaire et le béton de sable projetés, il est nécessaire d'aborder le fluage dont la littérature ne rapporte que peu de résultats. Une approche de la projection dans le cas des panneaux dalles est nécessaire pour se faire une idée assez complète sur la technique de projection du béton de sable. Enfin, l'étude des facteurs de durabilité du béton de sable projeté doit nécessairement compléter cette étude, d'autant plus que, mis à part le comportement au feu et au gel-dégel, les autres facteurs n'ont fait l'objet que de peu d'études. La prise en compte des deux facteurs de durabilité précités s'explique par le fait que le béton ordinaire projeté est surtout utilisé dans les pays froids dans les reprises en sous-œuvre et dans le renforcement des tunnels ; et donc des risques d'exposition au gel-dégel et au feu. En Algérie, il serait utile d'envisager les facteurs de durabilité liés aux attaques chimiques (acide, sulfate, ions chlore et carbonatation).

Références bibliographiques

ACI (American Concrete Institute) 506.2-95: Introduction of Revised Specification for Shotcrete and Other Shotcrete Development. ACI Spring 2012 Convention, March 18-21, Dallas, TX.

AFTES : Textes des recommandations relatives à la technologie et la mise en oeuvre du béton projeté, Tunnels et ouvrages souterrains, 1993, n°117, mai / juin, pp 84-105.

AFTES : La technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres. Tunnels et Ouvrages Souterrains, n°126, nov / déc 1994, pp 307-328.

AFTES: Recommendations on Fibre-Reinforced Sprayed Concrete Technology and Practice. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11 (2), pp 205-214.

AFPC-AFREM (Modes opératoires recommandés par l'AFPC-AFREM) : Compte rendu des journées techniques sur la durabilité des bétons, 11\12/déc.1997, Toulouse, France (LMDC, Toulouse, 1998), 283 pp.

Akchiche, H. : Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés des fibres de palmier dattier en régions désertiques. Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 16/05/2007, pp13.

Ansell, A.: Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains. Tunneling and Underground Space Technology, 25, 607-613 (2010).

ASA, American Shotcrete Association .website: [www. Shotcrete.org](http://www.Shotcrete.org)

ASQUAPRO, 2002 : Fascicule « Domaines d'emploi des bétons projetés ». Commission technique. Website: [www. asquapro.asso.fr](http://www.asquapro.asso.fr).

ASQUAPRO, 2005 : Fascicule « mise en œuvre des bétons projetés ». Commission technique. Website: [www. asquapro.asso.fr](http://www.asquapro.asso.fr).

Austin, S.; Robins, P.: Sprayed concrete: Properties; design and application. New York: Mc Graw-Hill, pp 44 (1995).

Austin, S.A.; Peaston, C.H.; Robins, P.J.: Material and fibre losses with fibre reinforced sprayed concrete. Construction and Building Materials, Vol.11, 291-298 (1997).

Austin, S.A.; Goodier, C.I.; Robins, P.J.: Low-Volume Wet-Process Sprayed Concrete: Pumping and Spraying. RILEM Materials and Structures, 38, 229-237 (2005).

Balayssac, J.P. ; Detriche, C.H. ; Grandet, J. : intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage. *Materials and Structures*, 26 (158), 226–230, 1993.

Baroghel-Bouny, V.; Ammouche, A.; Hornain, H.; Gawsewitch, J.: Vieillessement des bétons en milieu naturel. Une expérimentation pour le XXI^e siècle. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 228. 4328, 71-86 (2004).

Benaissa A. : Déformation différées d'un béton de sable. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Nov 1992.

Benaissa, A., Morlier, P., Viguier, C. Microstructure du beton de sable. *Cement and Concrete Research*. Volume 23, Issue 3, May 1993, Pages 663–674.

Benaissa, A.; Kamen, A.; Chouicha, K; Malab, S.: Panneau 3D au béton de sable. *Materials and Structures*, 41, 1377-1391 (2008).

Bentz, D.P.; Irassur, E.F.; Bucher, B.; Weis, W.I.: Limestone fillers conserve cement Part 1: An analysis based on Powers model. *Concrete Int.* 1, 41-6 (2009).

Bindiganavile, V.; Banthia, N.: Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin. *Cement and Concrete Composites*. 23, 503-514 (2001).

Brooks, J.J., Cabrera, J.G., Megat Johari, M.A. (1998). Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete, in: E. Tazawa (Ed.). *Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, E & FN Spon, 195-201.

Burns, D.; *Characterization of wet-mix Shotcrete for Small Line Pumping*, Laval University, Quebec. (2008).

Casanova, P. : Béton renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Série ouvrages d'art OA20, France, Fev. 1996.

Chanvillard, G. : *Le matériau béton : connaissances générales*, ENTPE Aléas, 175 p (1999).

Collins, F.; Sanjayan, J.G.: Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 1401-1406 (2000).

Damtoft, J.S.; Herfort, D.; Yde, E.: Concrete binders, mineral additions and chemical admixtures: state of the art and challengers for the 21st century. *Proceeding of International Seminar "Extending Performance of Concrete Structures"*, Dundee, UK, September 1999.

EVG-GRAZ : Manuel du système de construction EVG avec éléments tridimensionnels, volume 1-EVG GRAZ (AUSTRIA). Pehiem, Avril 1998.

Gérôme S.: Evaluation des paramètres d'obtention de la qualité des bétons projetés utilisés dans des soutènements provisoires, des revêtements définitifs et des renforcements d'ouvrages. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Thèse de doctorat (2003).

Gordon, K.; Specialist Pre-Blended materials, Sprayed Concrete: Properties, Design and Application (Eds. Austin, S. A. and Robins, P. J.). Whittles Publishing, Latheronwheel, UK, 16-30 (1995).

Hills, D.L.; Site-produced sprayed concrete. *Concrete*. 16, 44-50 (1982).

Hua, C., Gruz, X., Ehrlacher, A. Thin sand concrete plate of high resistance in traction. *Materials and Structures*. Volume 28, Issue 9, pp 550-553 (1995).

IUPAC-Manual of symbols and terminology, appendix 2, part 1- Colloid and surface chemistry. *J. Pure Appl. Chem.* 31 (1972) 578.

Jolin, M. ; Influence des accélérateurs de prise sur la durabilité des bétons projetés par voie sèche, Université Laval, Québec (1996).

Jolin, M.; Beaupré, D.; Mindess, S.: Tests of characterise properties of fresh dry-mix shotcrete. *Cement and Concrete Research*. 29, 753-760 (1999).

Jolin M.; Beaupre D.; Mindess S.: Rheology of dry-mix shotcrete. *Concrete Science and Engineering*. Vol 3, pp 195-201 (2001).

Joudi-Bahri, I.; Lecomte, A.; Ben Ouezdou, M.; Achour, T.: Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*. 34,771–780 (2012).

Kadri, E.H.; Duval, R.; Kenai, S.; Aggoun, S.: Silica fume effect on the hydration heat and compressive strength of high performance concrete. *ACI Mater* 106, 107-13 (2009).

Leung, C.K.Y.; Lai, R.; Lee, A.Y.F.: Properties of Wet-mixed fibre reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. *Cement and Concrete Research*. 35, 788-795 (2005).

Makhloufi, Z.; Kadri, E.H.; Bouhicha, M.; Benaissa, A.: Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution. *Construction and Building Materials*. 26, 497–504 (2012).

Malmberg, B. ; Steel reinforced concrete under free and restrained shrinkage. Fiber betong, Nord forsks projektkommitte för FRC-material, CBI in Swedish 1977.

Malmgren, L.; Nordlund, E.; Rolund, S.: Adhesion strength and shrinkage of shotcrete. Tunneling and Underground Space Technology. 20, 33-48 (2005).

Mindess, S.; Why fiber reinforced concrete?. Premier atelier canadien universités-industrie sur le béton renforcé de fibres. CRIB, 1991, Sainte-Foy, Québec.

Neville Adam, M. : Propriétés des bétons, Editions Eyrolles, 806 pages (2000).

Olivares Santiago, M. ; Remarques autour du rebond d'un béton projeté-Ciment, Bétons, Plâtres, Chaux, N° 795-2/1992.

Pfeuffer, M.; Kusterle, W.; Rheology of rebound behaviour dry-mix shotcrete. Cement and Concrete Research. 31, 1619-1625 (2001).

Raoux, L. «Méthodologie de formation des bétons de sable. ». Rapport de recherche No 91067 CEBTP(1994)

Resse, C. ; Venuat M. ; Projection des mortiers, bétons et plâtres, édité à compte d'auteur, 382 p (1981).

Robins, P. J. R.; Materials, Sprayed Concrete: Properties, Design and Application (Eds. Austin, S. A. and Robins, P. J.). Whittles Publishing, Latheronwheel, UK, 7-15 (1995).

Rossi, P. ; Les bétons de fibres métalliques. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1998).

SABLOCRETE, Synthèse du Projet National de Recherche et Développement, Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation, Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées LCPC, Paris (1994).

Tazawa, E., Miyazawa, S. (1993). Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology, in: Z.P. Bazant, L. Carol (Eds.), Creep and shrinkage of Concrete. Proceeding of the 5th International RILEM Symposium, E & FN Spon, London, 159-168.

Teichert P. ; Béton projeté, Ed. Laich, 141 p (1991).

Wittman, F.H.: Interaction of hardened cement paste and water. J. Am. Ceram. Soc. 56, 409-415 (1982).

Wolsiefer, J.; Morgan, D.R. : Silica fume in shotcrete. Concrete International. 15, 9-34 (1993).

Zellers, R.C.; High cost of steel not the only reason for using fibres as shotcrete reinforcement. ASA Shotcrete. 16-18 (2004).

Zhang, M.H., Tam, C.T., Leow, M.P. (2003). Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. Cement and concrete research, 33, 1687-1694.

Liste des figures

Figure 1.1 Procédé de projection par voie sèche.

Figure 1.2 Procédé de projection par voie mouillée

Figure 1.3 Courbes granulométriques d'un mélange réel projeté par voie sèche, du béton correspondant et des Pertes (Gérôme, 2003).

Figure 1.4 Courbes granulométriques d'un mélange réel projeté par voie mouillée et du béton correspondant (Gérôme, 2003).

Figure 1.5 Evolution du retrait endogène dans le temps des bétons projetés par voie sèche.

Figure 1.6 Evolution du retrait endogène dans le temps des bétons projetés par voie mouillée.

Figure 1.7 Evolution du fluage dans le temps des bétons projetés par voie sèche.

Figure 1.8 Evolution du fluage dans le temps des bétons projetés par voie mouillée.

Figure 1.9 Retrait d'auto-dessiccation.

Figure 1.10 Retrait total.

Figure 1.11 Fluage total.

Figure 1.12 Panneau 3D.

Figure 2.1 Courbe granulométrique des agrégats.

Figure 2.2. Fibres métalliques de type DRAMIX BEKAERT.

Figure 2.3 Presse de capacité 3000 KN.

Figure 2.4 Essai de traction par fendage.

Figure 2.5 Système de mesure du module d'élasticité.

Figure 2.6 Appareil de mesure du retrait.

Figure 2.7 Relation $P = f(V)$.

Figure 2.8 Courbes granulométriques des bétons projetés (BSP et BOP).

Figure 3.1 L'étalement en fonction du dosage en fibres du BOP.

Figure 3.2 L'étalement en fonction du dosage en fibres du BOP.

Figure 3.3 Traitement au computer de la rugosimétrie tridimensionnelle.

Figure 4.1 Résistance à la compression en fonction de l'âge.

Figure 4.2 Sens de prélèvement des carottes.

Figure 4.3 Evolution de la résistance en traction du béton projeté.

Figure 4.4 Résistance à la flexion des BSP, BSP*, BOP et BOP* en fonction de l'âge.

Figure 4.5 Retrait endogène en fonction de l'âge.

Figure 4.6 Retrait de séchage en fonction de l'âge.

Figure 4.7 Perte de poids en fonction de l'âge.

Figure 4.8 Répartition des tailles des pores du BSP.

Figure 4.9 Répartition des tailles des pores du BV.

Figure 4.10 Retrait de dessiccation des BSP et BOP en fonction de l'âge.

Figure 4.11 Effet des fibres métalliques sur le retrait de dessiccation en fonction de l'âge.

Figure 4.12 Retrait total des BSP et BV en fonction de l'âge.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Plage de valeurs des résistances en compression et moyennes pour les différentes échéances testées (MPa).

Tableau 2.1 Caractéristiques chimiques du ciment et des fillers calcaires.

Tableau 2.2. Propriétés physiques du sable.

Tableau 2.3 Caractéristiques des fibres DRAMIX.

Tableau 2.4 Bilan volumique.

Tableau 2.5 Composition des BSP, BOP et BV [kg/m³].

Tableau 2.6 Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons d'essais.

Tableau 3.1. Paramètres de comparaison du BSP projeté par V.S et V.H.

Tableau 3.2 Composition des BSP et BOP [kg/m³].

Tableau 3.3 Caractérisation des rebonds.