

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département : Génie civil

Ref :



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة المدنية

المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de

Doctorat en sciences

En génie civil

Option : Géo-matériaux

**VALORISATION DES DECHETS DE CARRIERES COMME
SUBSTITUANTS DANS LE BETON DE SABLE**

« Déchets de marbre »

Présentée par :

BOUGHAMSA Wassila

Soutenue publiquement le 07/07/2020

Devant le jury composé de :

Président	REHAB BEKKOUCHE Souhila	M.C.A	Université de Skikda
Rapporteur	HEBHOUB Houria	M.C.A	Université de Skikda
Examineur	BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma
Examineur	MEZHOUD Samy	M.C.A	Université de Constantine

Remerciements

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على سيدنا ونبينا محمد أشرف المرسلين

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de thèse, Madame HEBHOUB Houria. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'exprime ma gratitude à Monsieur BELACHIA Mouloud, professeur à l'université de Guelma, et chef de l'équipe « matériaux » du laboratoire de génie civil à l'université de Skikda. C'est la première personne m'ayant orienté vers la spécialité des matériaux de construction, en graduation et post-graduation. Je le remercie de m'avoir toujours conseillé et soutenu.

Je remercie M^{me}. REHAB BEKKOUCHE Souhila maître de conférence à l'université de Skikda d'avoir présidé le jury de soutenance ; les membres de jury ; professeur BELACHIA Mouloud l'université de Guelma et docteur MEZHOUUD Samy de l'université de Constantine, d'avoir accepté d'examiner ma thèse et d'assister à la soutenance, ainsi que DJEBIEN Rachid, maître de conférence à l'université de Skikda, invité d'honneur.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je n'oublie pas de remercier mes chères collègues et amies A.Abdelouahed, L.Kherraf, W.Mouats, et L.Boussalia qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Mes reconnaissances pour le directeur du laboratoire de l'habitat et de construction Monsieur BOUKADOUM Fayçal, ainsi que tout le personnel du laboratoire de béton, et M^{me}.BOUDJEMAA Razika la chimiste. Pour leur accueil et aide inconditionnels.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'études, de travail, d'échecs et de réussites :

A mes très chers parents, Tayeb et Yamina, qui ont toujours été là pour moi.

A mes chères sœurs Samira et Naïma, pour leurs encouragements et leurs aides.

A mes frères surtout Mohamed, Kamel et Hamza pour leurs aides pour mes déplacements effectués durant mon travail sur la partie expérimentale de ma thèse.

A mon cher mari BENHAMMAD Noureddine de m'avoir encouragé, soutenu et surtout pour sa grande patience pendant mon absence pour pouvoir achever ce travail.

A ma très chère fille « Alaa » qui m'a porté beaucoup de bonheur et de joie en donnant un autre goût à ma vie.

A toute personne qui partage ma réussite et ma joie, comme ma cousine BOUSSOUFA Fatima et mon amie intime LATOUI Samia.

Je vous remercie tous

RESUME

La récupération et la valorisation des déchets de carrières s'avèrent une solution à deux impacts : l'impact environnemental par la diminution de la pollution et la récupération de l'espace occupé par ces déchets et l'impact économique par l'utilisation de ces derniers dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Le présent travail consiste à récupérer deux déchets, un déchet généré par la carrière de marbre de Fil-fila, sise à l'Est de la ville de Skikda au Nord-Est de l'Algérie (*poudre jetée exposée aux différents phénomènes météorologiques*), et de l'ajouter comme substituant de sable ordinaire dans la composition du béton de sable, et un déchet sous forme de fines calcaires additionné au mélange pour améliorer sa compacité. Pour réaliser cette étude, nous avons analysé l'évolution apportée par la substitution des sables ordinaires par le sable de déchet de marbre, avec des taux de 25%, 50%, 75% et 100% sur les propriétés à l'état frais (la densité, l'ouvrabilité et l'air occlus) et à l'état durci (résistance à la compression et à la traction, dureté de surface, vitesse de propagation du son et la variation pondérale et dimensionnelle). La durabilité a été prospectée par les essais de l'absorption d'eau par immersion, la pénétration des chlorures (NaCl), ainsi que les attaques chimiques par des acides comme l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide acétique (CH₃COOH) et une solution basique (hydroxyde de sodium (KOH)). Les résultats obtenus sont comparés aux échantillons témoins de 0% de taux de substitution.

Afin d'avoir un bon remplissage des vides dans le squelette granulaire ; nous avons ajouté une quantité de fines recyclées de type calcaire provenant des carrières et pour une bonne ouvrabilité un adjuvant super-plastifiant. Les résultats ont montré que la substitution (partielle et totale), a modifié les caractéristiques à l'état frais comme à l'état durci des bétons testés. L'effet de la substitution sur la vulnérabilité aux attaques chimiques était assez remarquable.

Mots clés : valorisation, béton de sable, substitution, fines calcaires, déchets de carrières, déchet de marbre, performance mécanique, durabilité, attaques chimiques, retrait, gonflement.

ملخص

يعتبر تدوير وتثمين نفايات المحاجر حلاً ذو تأثيرين: الأثر البيئي من خلال الحد من التلوث واستعادة المساحة التي تشغلها هذه النفايات والتأثير الاقتصادي من خلال استخدامها في البناء والأشغال العمومية. لقد قمنا في هذه الدراسة باستغلال نوعين من النفايات الأولى ناتجة عن محجرة الرخام بقلعة، المتواجدة شرق مدينة سكيكدة في شمال شرق الجزائر (مسحوق معرض لمختلف ظواهر الأرصاد الجوية) ، وإضافته كرمال في تكوين الخرسانة الرملية ، والثاني عبارة عن نفايات على شكل حجر جبسي ناعم يضاف إلى الخليط لتحسين الكثافة. قد قمنا بتحليل التطور الناتج عن استبدال الرمال العادية برمال نفايات الرخام ، بمعدلات 25% و 50% و 75% و 100% على الخرسانة في الحالة الطرية (الكثافة ، قابلية الاستخدام ونسبة الهواء المحجوز) وفي الحالة الصلبة (مقاومة الانضغاط والشد ، صلابة السطح ، سرعة انتشار الصوت وتغير الكتل والأبعاد). أما من أجل الديمومة ، اختبرنا امتصاص الماء عن طريق الغمر واختراق الكلوريد والهجمات الكيميائية بواسطة المحاليل الحمضية مثل الكلوريدريك ، الاستيك والسولفيريك ، بالإضافة إلى محلول قاعدي وهو أكسيد البوتاسيوم . تمت بعد ذلك مقارنة النتائج المتحصل عليها مع العينات الشاهدة وقد لاحظنا أن الاستبدال الجزئي أو الكلي للرمال العادية بكمية من رمال نفايات الرخام، غير خصائص الخرسانة الرملية المختبرة في الحالة الطرية كما في الحالة الصلبة ، كما تأثرت معايير الديمومة بذلك.

الكلمات المفتاحية: التدوير ، الخرسانة الرملية ، التعويض ، نفايات المحاجر الجيرية ، نفايات الرخام ، الأداء الميكانيكي ، الديمومة،الهجمات الكيميائية، الإنكماش، الإنتفاخ.

ABSTRACT

The recovery and valorization of waste proves a solution with two impacts: the environmental impact by the reduction of pollution and the gain of the occupied space by this waste, and the economic impact by the use of these lasts in building and public works sector. The present research consists in recovering a waste marble (thrown powder exposed to the different meteorological phenomena) generated by the quarry marble of Fil-fila, located at the east side of Skikda in the north-east of Algeria, and add it, as sand replacement in the composition of sand concrete. Another waste in the form of fine limestone was added to the mixture to improve its compactness. To carry out this research, the evolution brought by the substitution of ordinary sand by marble waste sand, with 25% , 50% , 75% and 100%, was expected for the properties in the fresh state (density, workability and air content) and in the cured state (compressive strength, tensile strength, surface hardness and sound velocity, weight and dimensional changes). For durability, water absorption by immersion and chloride penetration were tested. Also, chemical attacks by solutions of chlorhydric, sulfuric and acetic acids (HCl, H₂SO₄, and CH₃COOH), with a basic solution of hydroxide of sodium (KOH), were expected.

The results obtained are compared with control samples of 0% of substitution rate. In order to have a good filling of the voids in the granular skeleton; a quantity of limestone recycled fines from the quarries was added, and super-plasticizing for good workability. The results showed that the substitution of ordinary sand in sand concrete, modified both the fresh and the hardened characteristics of the tested concretes, the durability parameters were also affected.

Key words: valorization, sand concrete, substitution, quarry waste, waste marble, calcareous fillers, mechanical performance, durability, chemical attacks, shrinkage, swelling.

SOMMAIRE

Liste des tableaux	i
Liste des figures	ii

Introduction générale

Chapitre I Recherche bibliographique et travaux antérieurs

I.1.Introduction	5
I.2.Béton de sable	5
I.2.1. Définition	5
I.2.2. Historique	7
I.2.3. Composition du béton de sable	8
I.2.4. Propriété du béton de sable	8
I.2.4.1.Propriétés à l'état frais	11
I.2.4.2. Propriétés à l'état durci	11
I.2.6. Durabilité des bétons de sable	11
I.2.7. Formulation d'un béton de sable	14
I.2.7.1 Description de quelques approches de formulation du béton de sable	14
I.2.7.2 Estimation du dosage en fines d'un béton de sable	16
I.2.7.3. Porosité et dosage en eau d'un béton de sable	17
I.2.7.4. Estimation de la résistance en compression	18
I.2.8. Applications du béton de sable	20
I.2.9. Avantages et domaines d'application de béton de sable	21
I.2.10. Fabrication et mise en œuvre	22
I.2.10.1. Malaxage	22
I.2.10.2. Coulage et vibration	22
I.3. Valorisation des déchets de carrières comme matériaux de construction	22
I.3.1. Introduction	23
I.3.2. Déchets de carrières	24
I.3.3. Valorisation des déchets de marbre comme matériaux de construction	24
I.3.3.1. Introduction	24
I.3.3.2. Les carrières à blocs	27
I.3.3.3. Les carrières de dérivées	27
I.3.3.4. Carrières de marbre de Filfila (Skikda)	29
I.3.3.5. Optique de l'entreprise envers la gestion des déchets de marbre	30
I.4. Travaux antérieurs	31
I.5. Conclusion	34

Chapitre II Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction	36
II.2. Matériaux utilisés	36
II.2.1. Le ciment	36
II.2.2. Sables ordinaires	38
II.2.3. Sable de déchets de marbre	39
II.2.4. Fines calcaires	42
II.2.5. Adjuvant	42
II.2.6. Eau de gâchage	43
II.3. Conclusion	43

Chapitre III Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1.Introduction	46
III.2.Programme expérimental	46
III.2.1. Etude de la composition des mélanges selon la méthode de SABLOCRETE	46
III.2.1.1.Substitution de sable de dune par le sable de déchet de marbre	48
III.2.1.2.Substitution de sable de carrière par le sable de déchets de marbre	48
III.2.2. Formulation des mélanges	48
III.2.3. Fabrication des mélanges	50
III.2.4. Méthodes d'essais	54
III.2.4.1. Essais effectués sur le béton frais	54
III.2.4.2. Essais effectués sur le béton durci	55
III.3. Conclusion	63

Chapitre IV. Effet du taux de substitution et le type de sable sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable

IV.1.Introduction	65
IV.2. Effet du taux de substitution sur les propriétés physiques du béton frais	65
IV.2.1. Ouvrabilité	65
IV.2.2 Air occlus	66
IV.2.3. Masse volumique	67
IV.3. Effet du taux de substitution sur les propriétés physiques du béton durci	67
IV.3.1. Résistance à la compression	67
IV.3.2. Résistance à la traction par flexion	70
IV.3.3.Vitesse de propagation de son (essai ultrasonique)	72
IV.3.4.La résistance à la compression déterminée avec la méthode combinée en fonction de l'indice de rebondissement et la vitesse du son	73
IV.4. Variations pondérales et dimensionnelles	75
IV.4.1. Retrait total et perte en masse	75
IV.4.2. Retrait endogène et perte en masse	79
IV.4.3. Gonflement et gain en masse	82
IV.5. Conclusions	85

Chapitre V Effet du taux de substitution et le type de sable sur les paramètres de durabilité

V.1. Introduction	87
V.2. Effet du taux de substitution et le type de sable sur les paramètres de durabilité	87
V.2.1.Absorption d'eau par immersion	87
V.2.2. Pénétration des chlorures	87
V.2.3. Attaques chimiques	90
V.2.3.1. Attaques par une solution à 5% de l'acide acétique (CH ₃ COOH)	90
V.2.3.2. Attaques par une solution de 5% de l'acide chlorhydrique (HCl)	92
V.2.3.3. Attaques par une solution de 5% d'hydroxyde de potassium (KOH)	94
V.2.3.4. Attaques chimiques par une solution de 5% de l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄)	95
V.3.Conclusions	98

Conclusions générales, recommandations et perspectives	101
Références bibliographiques	105
Annexe	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Classes de consistance	09
Tableau I-2 : Production de la carrière des dérivés	28
Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment	37
Tableau II-2 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	38
Tableau II-3: Caractéristiques physiques des sables ordinaires	38
Tableau II-4 : Composition chimique des sables ordinaires	38
Tableau II-5 : Caractéristiques physiques de sable de déchets de marbre	40
Tableau II-6: Composition chimique du sable de déchet de marbre	40
Tableau II-7: Analyse chimique des fines calcaires	42
Tableau II-8: Propriétés physiques et chimiques de l'adjuvant	43
Tableau II-9: Analyse chimique de l'eau	43
Tableau III-1: Différentes compositions utilisées dans l'étude de la formulation BSD	48
Tableau III-2: Différentes compositions utilisées dans l'étude de la formulation BSC	48
Tableau III-3: Composition des mélanges de la campagne 1(formulation BSD)	49
Tableau III-4: Composition des mélanges de la campagne 2(formulation BSC)	49
Tableau III-5: Essais effectués sur les différents mélanges	50
Tableau III-6: Mode de conservation des éprouvettes après le démoulage	53

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Affaissement au Cône d'Abrams	09
Figure I-2 : Aéromètre à béton	10
Figure I-3 : Mesure de la densité	10
Figure I-4 : Retrait d'auto-dessiccation	13
Figure I-5: Evolution du retrait total dans le béton de sable (SABLOCRETE, 1994)	13
Figure I-6: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable (SABLOCRETE, 1994)	18
Figure I-7 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) (SABLOCRETE, 1994)	20
Figure I-8: Le gisement d'Onyx d'Ain Smara	25
Figure I-9: Carrière de MAHOUNA (GUELMA).	26
Figure I-10 : La Carrière à blocs de marbre de KRYSTEL (ORAN)	27
Figure I-11 : La Carrière des dérivés de marbre d'AGOULMINE (TIZI-OUZOU)	27
Figure I-12: La Carrière de de dérivés de TADJRA (TLEMEN)	28
Figure I-13 : Station de concassage La Carrière des dérivés CHATT (SKIKDA)	28
Figure I-14 : Poudre de marbre déclassée	29
Figure I-15: La carrière à blocs de Filfila	29
Figure I-16: La carrière de dérivées Echatt de Filfila	30
Figure II-1: Le ciment utilisé	36
Figure II-2: Mesure de la densité	37
Figure II-3: Mesure de la surface spécifique de Blaine	37
Figure II-4: Analyse granulométrique des sables ordinaires	39
Figure II-5: Sable de déchet de marbre	39
Figure II-6 : Courbe granulométrique du sable de déchets de marbre	41
Figure II-7 : Courbes granulométriques du sable de déchets de marbre et des sables ordinaires	41
Figure II-8 : L'adjuvant utilisé	42
Figure III-1: Malaxage	50
Figure III-2: Différents types des moules utilisés	51
Figure III-3: Eprouvtes avant le démoulage	52
Figure III-4: Conservation des éprouvettes dans l'eau	52
Figure III-5: Eprouvtes enveloppée de papier aluminium	52
Figure III-6: Conservation des éprouvettes dans les solutions chimiques	53
Figure III-7: Mesure de la masse volumique du béton frais	54
Figure III-8: Affaissement au cône d'Abrams	55
Figure III-9: Aéromètre à béton	55
Figure III-10: Résistance à la compression	56
Figure III-11: Essai de traction par flexion trois points	56
Figure III-12: Essai ultrasonique	57
Figure III-13: Essai au scléromètre	57
Figure III-14: Essai d'absorption par immersion	58
Figure III-15: Essai perte en masse	59
Figure III-16: Méthode de mesure du retrait et du gonflement	60
Figure III-17: Mesure de la variation dimensionnelle (retrait et gonflement)	60
Figure III-18: Essai des attaques chimiques	61
Figure III-19: Conservation des éprouvettes dans la solution des chlorures de sodium NaCl	62

Figure III-20: Eprouvette coupée en deux et versement de l'AgNO ₃	62
Figure III-21: Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures	63
Figure IV-1: Evolution de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution	65
Figure IV-2: Evolution de la teneur de l'air occlus en fonction du taux de substitution	66
Figure IV-3: Evolution de la densité en fonction du taux de substitution	67
Figure IV-4: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de dune	68
Figure IV-5: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de carrière	68
Figure IV-6: Comparaisons de la résistance à la compression du béton de sable de dune et du béton de sable de carrière selon les taux de substitution	68
à 02 jours ;(b) à 07jours ; (c) à 28jours ; (d) à 90jours.	69
FigureIV-7 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de carrière	70
FigureIV-8 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de dune.	71
Figure IV-9 : comparaisons de la résistance à la traction du béton de sable de dune et du béton de sable de carrière en fonction de l'âge et des taux de substitution : (a) à 02jours (b)à 07jours (c)à 28jours (d)à 90jours	72
Figure IV-10 : La vitesse de propagation du son en fonction du taux de substitution	73
Figure IV-11 : L'indice sclérométrique en fonction du taux de substitution	74
Figure IV-12 : La résistance à la compression correspondante à l'indice de rebondissement des deux bétons de sable	74
Figure IV-13 : La résistance à la compression selon la formule combinée	75
Figure IV-14 : Effet de la substitution sur le retrait total du BSC et BSM en fonction de l'âge	75
Figure IV-15 : Effet de la substitution sur la perte en masse du BSC et BSM en fonction de l'âge	76
Figure IV-16 : Effet de la substitution sur le retrait total du BSD et BSM en fonction de l'âge	76
Figure IV-17 : Effet de la substitution sur la perte en masse du BSD et BSM en fonction de l'âge	77
Figure IV-18 : comparaison de la perte en masse à l'air en fonction du taux de substitution entre le BSC et BSD	78
Figure IV-19: Effet de la substitution sur le retrait endogène du BSC et BSM en fonction de l'âge	78
Figure IV-20 : Effet de la substitution sur la perte en masse du BSC et BSM en fonction de l'âge	79
Figure IV-21: Effet de la substitution sur le retrait endogène du BSD et BSM en fonction de l'âge	80
Figure IV-22 : Effet de la substitution sur la perte en masse endogène du BSD et BSM en fonction de l'âge	81

INTRODUCTION

Générale

Introduction générale

La récupération et la revalorisation des déchets, s'avèrent une priorité des gouvernements, car elle a un effet direct et/ou indirect sur leurs économies et leurs environnements.

L'industrie des granulats, des pierres ornementales et des matières premières destinées à la fabrication des ciments, produit beaucoup de déchets. Ces derniers occupent des espaces verts, ils s'envolent dans l'air, ils peuvent pénétrer dans le sous-sol et donc contaminer les eaux sous-terraines; ils peuvent se déposer sur les plantes et affecter toute une vie biologique et microbiologique.

Les déchets de carrières sont souvent inertes, mais la diversité de leur composition, présente un problème pour les réutiliser dans les bétons. Beaucoup de recherches scientifiques étudient la possibilité de récupérer ces déchets et les utiliser dans les différents bétons et mortiers, afin d'améliorer certaines performances.

Aujourd'hui, avec la crise financière que traverse l'Algérie, le déficit en logements et la pénurie des gros granulats dans certaines régions, il est devenu impératif de construire au moindre coût en valorisant les matériaux locaux. C'est dans ce cadre que dans les années 80, l'ENPA et le CNERIB ont lancé des projets de recherche sur le béton de sable.

Au début, ces recherches avaient comme but la détermination d'une composition optimale, puis elles se sont intéressées à la recherche d'une amélioration de la résistance grâce à l'utilisation des fillers et des adjuvants. Par la suite des études de retrait, de fluage et d'adhérence aux armatures ont été effectuées. Plusieurs résultats ont été obtenus, mais ces derniers restent toujours insuffisants et non généralisés (Rezig, 2012).

Depuis 2002, plusieurs chercheurs du département de génie civil de l'université de Skikda ont exploité les déchets de marbre produits par la carrière de marbre de Fil-fila, dans des travaux de recherche, pour le développement des bétons et mortiers. Les premiers initiateurs étaient professeur Belachia Mouloud avec docteur Hebhou Houria et leurs thésards, dont on peut citer docteur Djebien Rachid et docteur Kherraf Leila. Ils ont publié plusieurs travaux dans des revues nationales et internationales.

L'objet de la présente recherche est d'étudier la possibilité d'avoir un béton de sable à base de matériaux locaux avec l'incorporation de déchets de marbre, afin d'avoir des performances meilleures lui permettant de répondre aux besoins du marché de la construction, tout en visant ces trois principaux horizons:

- La protection de l'environnement par l'élimination de ces déchets nocifs pour la nature;
- L'exploitation des quantités colossales de sable existantes dans le Sahara de notre pays l'Algérie, qui couvre 80% de la superficie totale, soit environ deux millions de km²;
- Diminuer le coût des constructions avec un éventuel remplacement du béton conventionnel par le béton de sable;

Pour ce faire et afin de travailler sur l'objectif sus cité, nous avons utilisé le sable de déchet de marbre venant de la carrière de Fil-fila et un déchet récupéré des filtres de la carrière de Ben Azzouz à l'Est de Skikda, sous forme de fines de nature calcaire.

Le déchet de marbre est utilisé comme substituant dans le sable du béton de sable et les fines sont ajoutés dans la composition pour améliorer la plasticité du mélange. Deux types de sable ont été utilisés, un sable dunaire roulé et un sable de carrière concassé.

La thèse est composée de cinq (05) chapitres dont le contenu a été distribué comme suit:

- Le premier chapitre est une recherche bibliographique sur le béton de sable (propriétés, formulation et domaines d'utilisation), les déchets de carrières, et plus précisément les fines calcaires et le déchet de marbre, puis un aperçu sur les travaux de recherche réalisés à travers le monde, sur son utilisation dans le béton, le mortier et le ciment;
- Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des différents matériaux utilisés dans l'étude, (ciment, sable de dune, sable de carrière, sable de déchet de marbre, fillers calcaires et adjuvant);
- Le troisième chapitre contient le programme expérimental avec le détail de préparation et conservation des différents mélanges ainsi que les essais réalisés sur ces derniers; où nous avons procédé au remplacement partiel et total avec des taux de 25, 50, 75 et 100% d'un sable ordinaire par un sable de déchet de marbre. Deux types de sables (roulés et concassés) ont été utilisés. Le programme expérimental est divisé en deux campagnes:

Campagne 1: Fabriquer des bétons de sable à base d'un sable de dune de classe 0/1 (formulation BSD) et le substituer par le sable de déchet de marbre de classe 0/2 avec les taux 0%, 25%, 50%, 75% et 100%.

Campagne 2: Fabriquer des bétons de sable à base d'un sable de carrière de classe 0/3 (formulation BSC) et le substituer par le sable de déchet de marbre de classe 0/2 avec les taux 0%, 25%, 50%, 75% et 100%.

- Le chapitre quatre expose les résultats et les discussions de l'effet du taux de substitution et le type de granulat sur les propriétés physico-mécaniques du béton de sable. On présentera les résultats des propriétés physiques du béton frais (densité, ouvrabilité, air occlus), les propriétés mécaniques à l'état durci (résistances à la compression et à la traction, la dureté de surface et l'auscultation sonore) ainsi que la variation pondérale (perte et gain en masse) et dimensionnelle (retrait total, retrait endogène et gonflement). On étudie alors l'effet du taux de substitution sur les performances du béton à l'état frais comme à l'état durci; et on termine par une comparaison des résultats sur les différentes formulations.
- Le chapitre cinq réunit les résultats et leurs discussions sur l'effet du taux de substitution et le type de granulat sur les paramètres de durabilité (absorption par immersion, pénétration des chlorures, attaques chimiques par des solutions de 5% de concentration d'acides et de bases (CH_3COOH , HCl , KOH et H_2SO_4);

La thèse est accomplie par une conclusion générale qui comporte une synthèse de tous les résultats obtenus, sur la possibilité de revaloriser le déchet de marbre dans le béton de sable. Puis nous avons proposé quelques recommandations et perspectives, pour donner une suite à la présente recherche.

Chapitre I

Recherche bibliographique et travaux antérieurs

I. Recherche bibliographique et travaux antérieurs

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons une synthèse bibliographique sur le béton de sable où on présentera d'abord son historique et son origine, ensuite on donnera une description de ses constituants et de ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. Après, on décrit les méthodes de formulation et domaines d'utilisation.

Comme nous allons utiliser les déchets de carrières dans le béton de sable, nous avons donné un aperçu sur ces derniers ainsi que le déchet de marbre et on a parlé des carrières de marbre existantes à l'échelle nationale.

On trouve à la fin du chapitre les travaux de recherches réalisés sur les différents types de béton dans lesquels on a utilisé le marbre

I.2. Béton de sable

I.2.1. Définition

Le béton de sable est un béton fin constitué par mélange de sable, de ciment, d'additions et d'eau; Il comporte habituellement un/ou plusieurs adjuvant(s) et éventuellement des ajouts. Il a fait actuellement l'objet de différentes recherches dans lesquelles il a été montré que, parfois le béton de sable peut concurrencer le béton traditionnel dans certains usages, il possède des propriétés spécifiques intéressantes, telle que la résistance, l'absence de ségrégation et le bel aspect de surface ainsi que la petite granularité, qui favorisent son utilisation dans certaines structures ainsi que son coût moins élevé en se passant de l'utilisation des gros granulats. **(Ayachi,2011)**

Le béton de sable a les particularités suivantes:

- Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevées et destiné aux usage traditionnels du béton;
- Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable(s) élevé, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidifiassions par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peut être nécessaire), et l'incorporation d'ajout; il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et par ce qu'il peut être utilisé pour la réalisation des éléments de résistance pour bâtiments et chaussées; c'est donc un matériau qui répond aux critères d'un béton traditionnel en termes de performances, de durabilité et de comportement**(Ayachi,2011)**.

I.2.2. Historique

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le béton aggloméré confectionné par Coignet dans le 3ème quart de XIX siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement à Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Saïd en Egypte (hauteur: 52m) et du pont de New-York **(CEBTP, 1986)**.

Les premières tentatives de correction granulaire reste l'apanage de Coignet qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872, mélangea un sable fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction.

Cette technique a été mise au point depuis des décennies, en URSS, en témoignent les réalisations du port Kaliningrad en Prusse- Orientale en béton de sable au début du siècle et aussi du pont de Chernavskif coulé sur place à Voronej (500Km de Moscou) (**Chauvin, 1987**).

A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder, a permis l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines: (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.).

Créé en 1988, le projet national **SABLOCRETE** était inscrit dans la logique du programme MATERLOC, programme d'utilisation optimale des matériaux locaux dans le génie civil et le bâtiment.

Dans un contexte d'épuisement progressif des ressources en gros granulats, il était alors aisé d'entrevoir, dès l'origine, l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables naturels ou de concassage, peu ou pas exploités, pour la réalisation des bétons dont ils seraient le constituant principal.

Mais les travaux du projet national ont également, et surtout mis en évidence des propriétés spécifiques du béton de sable qui lui permettent d'apporter une réponse adaptée à des problèmes mal résolus par le béton traditionnel et lui donnent ainsi une place à part entière dans la gamme des bétons.

C'est le mérite du projet national, parrainé par le ministère de l'équipement, direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques et de l'association **SABLOCRETE**, créée pour l'animer, que d'avoir permis de mobiliser autour de ce thème des hommes d'horizons divers: chercheurs des secteurs public et privé, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, bureaux d'étude et de contrôle, carriers, entrepreneurs et industriels de la filière BTP, qui ont contribué, ensemble et sans clivage, à faire progresser les connaissances sur le matériau, par leurs recherches et réalisations.

Cet ouvrage est l'aboutissement de six ans de travail et de la collaboration exemplaire de tous ces intervenants. Il s'appuie sur vingt-huit actions de recherches approfondies et trente opérations expérimentales et pilotes, largement évoquées dans le texte.

Il a été conçu comme une synthèse des connaissances acquises sur le sujet. Certes, le sujet est loin d'être épuisé. De même que pour le béton traditionnel et les nouveaux bétons, des générations de chercheurs vont devoir approfondir et affiner ces travaux.

Dans l'immédiat, il doit être simplement considéré comme un guide destiné aux futurs utilisateurs des bétons de sable. Puissent-ils y trouver les informations qu'ils recherchent.

I.2.3. Composition du béton de sable

Les constituants rentrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton traditionnel, matériau normalisé et par conséquent eux-mêmes normalisés et répondant à des avis techniques pour une utilisation dans le béton.

Comme pour tout mélange, chaque constituant a un rôle bien défini pour l'obtention des performances souhaitées.

a- Le sable

On entend par sable, tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NFP 18-101 et NFP 18-301. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulométrique n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable. On peut bien utiliser un sable fin (type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier.

D'ailleurs, des programmes nationaux de recherche (SABLOCRETE en France, par exemple) s'efforcent de promouvoir l'utilisation de tous les types de sable.

En effet la seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. Il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sables propres, tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique.

b- Le ciment

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NFP 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Notons que le dosage en ciment dans le béton de sable est du même ordre de grandeur que celui des bétons traditionnels: entre 200 et 400 kg/m³.

c- L'eau

Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante. Le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des bétons traditionnels et pour le réduire on a recours à des adjuvants. En général, le rapport E/C est compris entre 0,6 et 0,7.

d- Les adjuvants

Ce sont des produits chimiques utilisés à faible dose, de la même façon et dans le même but que pour les bétons classiques (amélioration des performances mécaniques à court, moyen et long terme).

Dans la technique du béton de sable, sont principalement utilisés des plastifiants permettant de réduire le dosage en eau et, par conséquent, d'augmenter la résistance et la compacité tout en amoindrissant les risques de retrait excessif.

Cependant, les adjuvants améliorent ou facilitent aussi la mise en œuvre du béton (la maniabilité).

e- L'addition

Par définition, le béton de sable contient une (ou plusieurs) addition, il s'agit essentiellement de fillers calcaires, siliceux, de laitier et de cendre volantes, mais aussi d'autres fines (argile calcinée, ultrafines).

Les additions proviennent directement du sable (cas des sables fileries) et/ou d'apport. Elles comblent en partie les vides du sable: elles augmentent donc sa compacité naturelle et créent une granulométrie aussi continue que possible. Mais elles participent également à l'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange.

Elles permettent ainsi d'augmenter les performances sans augmenter le dosage en ciment évitant ainsi les risques de retrait et d'excès de rigidité. Provoqués par un surdosage en ciment. Leur efficacité est, en ce domaine, fonction de leur nature minéralogique, de leur finesse et de leurs activités hydrauliques ou pouzzolaniques.

I.2.4. Propriété du béton de sable

I.2.4.1. Propriétés à l'état frais

a- Ouvrabilité

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

- **Affaissement au cône d'Abram**

Cet essai (Slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre.

Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de la norme NF P18-451 et est schématisé sur la (figure I-1).



Figure I-1: Affaissement au cône d'Abrams(prise de vue)

- **Classes de consistance**

La classe de consistance définit l'ouvrabilité ou maniabilité du béton c'est-à-dire la capacité de la matière à se mettre en place.

Les classes de consistance de béton frais sont données par le tableau I-1.

Tableau I-1: Classes de consistance

Classe de consistance	Affaissement (mm)
S1 : Ferme	0 à 40
S2 : Plastique	50 à 90
S3 : Très plastique	100 à 150
S4 : Fluide	160 à 210
S5 : Très fluide	≥ 220

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams selon la norme EN 12350-2.

b-Air occlus

La mesure de l'air occlus a été faite à l'aide d'un aéromètre à béton (figure I-2) de huit litres selon la norme NF P18-583.

Après avoir rempli la chambre inférieure de l'aéromètre de la même façon que celle pour remplir les moules.

La chambre supérieure étant soigneusement fixée, on applique une pression à l'aide de la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. A ce moment, on ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres, le béton se comprime et le pourcentage de l'air occlus est directement indiqué par le manomètre intégré dans l'aéromètre.



Figure I-2: Aéromètre à béton (prise de vue)

c- Densité

On se sert à la chambre inférieure de l'aéromètre (figure I-3), si les poids de la chambre pleine et vide sont successivement P et P₀, la densité du mélange frais est tel que:

$$\rho = \frac{P - P_0}{V} \quad (I-1)$$



Figure I-3: Mesure de la densité (prise de vue)

d- Ségrégation

C'est un phénomène connu, que les matériaux constitués par des grains de grosseurs différentes ont une tendance plus ou moins grande à la ségrégation.

Cette propriété fâcheuse consiste en un classement des grains d'après leur grosseur, provoquant des excès de particules fines ou grosses dans certaines régions.

Si par exemple, on décharge un mélange homogène de sable et gravier sec, les gros grains roulent autour du tas alors que les grains fins se concentrent en son milieu.

Quand les conditions sont particulièrement favorables à la ségrégation, la séparation est telle qu'on n'a pratiquement plus de mélange des deux matériaux sable et gravier.

La ségrégation peut se produire lors de tout mouvement (accélération) d'un mélange, car les grains des différentes grosseurs s'y comportent différemment.

La force vive (masse \times vitesses) des grains les plus lourds étant plus grande que celle des grains légers, il faudrait de plus grandes forces de freinage pour les arrêter.

Or ces frottements sont au contraire plus faibles pour les gros grains que pour les petits car à volume égal, leur surface est plus petite.

Ce rapport entre la surface des grains et leur volume, rapport qui croît quand les grains deviennent plus petits, est une mesure des frottements internes et de la cohésion des particules entre elles.

I.2.4.2. Propriétés à l'état durci

Généralement les bétons sont classés selon leurs résistances à 28 jours, cette dernière est souvent influencée par plusieurs facteurs entre autres le rapport E/C, le dosage et la classe de ciment, la nature et les proportions des granulats, les conditions climatiques et de mise en œuvre sans oublier l'influence des ajouts (fillers, fibres.....).

La mesure de la résistance se fait par les essais de flexion et de compression permettant de déterminer la contrainte de rupture de traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression du béton de sable ou de mortier.

a-Résistance à la compression

C'est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur les éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme [NF EN 12390-3].

b- Résistance à la traction

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{t28} (Chanvillard, 1999)

I.2.6. Durabilité des bétons de sable

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques.....etc. C'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité.

Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

Enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la vanne, phare de Port-Saïd en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris, etc. (Maillot, 2001).

a- Gonflement

La pâte de ciment ou le béton muris continuellement dans l'eau après leur mise en place et augmentent en volume et en masse.

Ce gonflement est dû à l'absorption d'eau par le gel de ciment. Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement.

b- Retrait

Est une diminution dimensionnelle du béton en l'absence de chargement, dû à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège de retrait se situe dans la pâte du ciment. Selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton cinq types de retrait: le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation.

Ces retraits provoquent des contraintes internes qui se matérialisent par l'apparition de fissures macroscopiques et microscopiques à la surface de l'élément de béton ou dans l'ensemble de sa masse, ces fissures détériorent l'esthétique et endommagent l'élément, par l'accélération de la corrosion du béton et des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs (Menou, 2004).

- Retrait endogène: Ce type de retrait est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'hydratation du ciment non encore hydraté, phénomène connu comme l'auto dessiccation (Bernard et al., 2001);
- Retrait de séchage: L'eau qui s'évapore d'un béton conservé dans de l'air non saturé provoque du retrait, dit de séchage. Une partie de ce mouvement est irréversible et doit être distinguée de celui réversible dû à une conservation où alternant des conditions de séchage et d'humidité (Bernard et al., 2001).

On indique les valeurs moyennes de retrait en mm/m ci-après (Neville, 2000):

-Dans les régions très humides $\frac{\Delta L}{L} = 1.5 \times 10^{-4}$ à 2×10^{-4}

-Dans les régions très sèches (Sahara) $\frac{\Delta L}{L} = 5 \times 10^{-4}$

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence,

couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable.

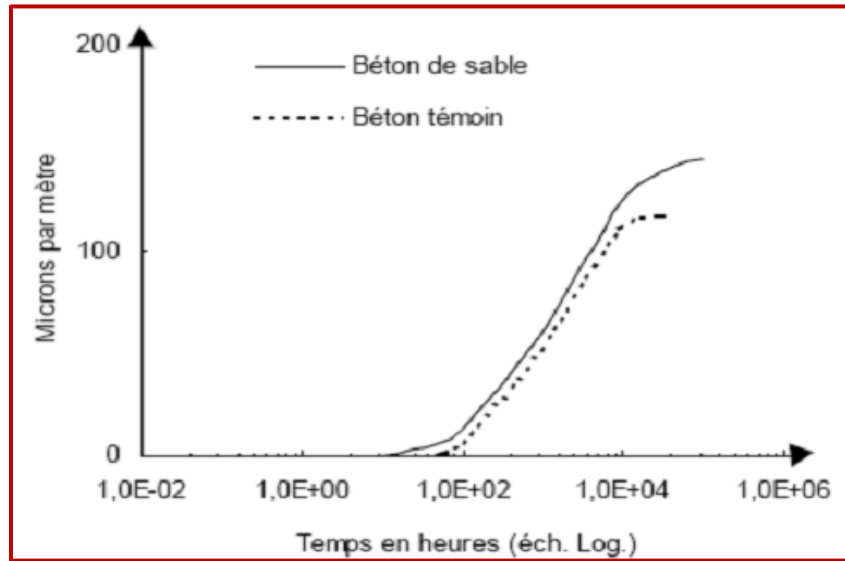


Figure I-4:Retrait d'auto-dessiccation(SABLOCRETE, 1994)

Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons, en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondant globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48 (figure I-4).

En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage). Notons que la valeur du retrait du béton de sable (figure I-5) est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche.

Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire (Rezig, 2012)

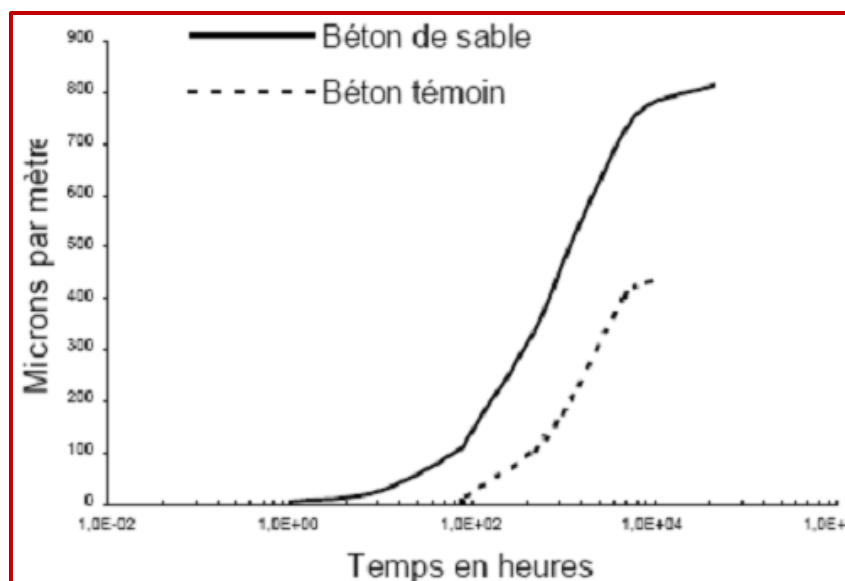


Figure I-5: Evolution du retrait total dans le béton de sable (SABLOCRETE, 1994)

c- Perméabilité

La perméabilité varie en fonction de la taille des pores et de leurs continuités; de ce fait un matériau ayant un taux de pores élevés, de tailles grandes et continues présente une perméabilité forte, ce qui conduit à une durabilité faible.

En suivant cette hypothèse un béton de sable aura une perméabilité moins élevée d'où une durabilité plus forte.

Cette distribution poreuse particulière, observée sur beaucoup de béton de sable optimisé dans le cadre du projet **SABLOCRETE**, contribue pour une bonne part à leurs bons comportements vis-à-vis des essais de durabilité.

D'autres parts, la perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement Inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques.

d- Absorption capillaire

L'absorption dépend essentiellement du taux et de la continuité des petits pores:

Un matériau qui présente un taux élevé de petits pores continus aura une absorption capillaire très élevée, et par conséquent une durabilité plus faible.

Par contre s'il présente un taux élevé de petits pores discontinus, l'absorption capillaire sera moins élevée et la durabilité augmente, c'est le cas d'un béton de sable bien compacté.

I.2.7. Formulation d'un béton de sable

Formuler 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.

Les approches de formulation des bétons de sable sont complétées par, la méthode de formulation théorique basée sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire, et la méthode expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives.

I.2.7.1. Description de quelques approches de formulation du béton de sable

a- Approche de GUINEZ, GLUAIS et DELUDE en 1984

Cette approche est basée sur l'augmentation de la compacité du béton par l'adjonction d'un filler.

L'étude a été menée sur un sable alluvionnaire 0/3 mm pour être ensuite étendue à d'autres types de sable.

L'objectif recherché était l'obtention d'une compacité maximale, pour que les caractéristiques physiques et mécaniques soient meilleures.

La première étape: consistait à rechercher par tâtonnements un mélange de sable, ciment et eau (formulation de base) possédant une bonne maniabilité et une résistance à la compression voisine de celle des briques et des parpaings (autour de 8 MPa).

Cinq formules dosées respectivement de 450, 350, 300, 250 et 200Kg de ciment par mètre cube (m^3) ont été soumises à des essais mécaniques.

La deuxième étape: consistait à améliorer les performances de la formulation de base par la recherche de la meilleure correction granulaire possible, avec l'introduction du type de filler qui convient.

Pour cela, trois types de fillers (calcaires), différents par leurs granulométries ont été utilisés à divers dosages.

Les dosages en ciment et en eau ont été fixés à $300Kg/m^3$ et $240l/m^3$ respectivement.

Les quantités de sable et de filler sont variables.

Les fillers employés avaient les caractéristiques granulométriques suivantes:

- Filler V : le plus fin, 75% des grains inférieurs à 20 microns.
- Filler R : 62 % des grains inférieurs à 40 microns.
- Filler F 3 : 20 % des grains inférieurs à 40 microns et 75 % inférieurs à 200 microns.

C'est la correction par le filler le plus fin (filler V) qui a donné les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques.

La troisième étape: la quantité de ciment a été réduite à $250 Kg/m^3$ et divers adjuvants (plastifiants) ont été utilisés.

b- Approche de CHAUVIN en 1987

Pour formuler ses bétons de sable, **CHAUVIN** s'était fixé au préalable le dosage en ciment et en eau à $350 kg/m^3$ et $250l/m^3$ respectivement; le dosage en eau a été choisi arbitrairement. Il a ensuite étudié les relations existantes entre la nature et le dosage en fillers d'un côté, et les principales caractéristiques du béton de l'autre côté (résistance, compacité et maniabilité).

c- Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable

- **La compacité et la formulation**

Dans le béton, les granulats jouent le rôle d'ossature dans laquelle la pâte assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion et fluidité) qui donne au béton frais les propriétés d'agglomération et de maniabilité, puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton durci.

La formulation d'un béton consiste à optimiser le squelette granulaire selon un choix judicieux des proportions de sable et de gravier ensuite 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.

Au début du 20^{ème} siècle, **CAQUOT** a pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) tel que:

$$V = V_0 (d/D) \quad (\text{I-2})$$

Où

d : correspond à la dimension du tamis retenant 90 % des granulats.

V_0 : constante empirique égale à 0,5.

D : correspond à la dimension du tamis retenant 10 % des granulats.

Cette formule sous-entend que le mélange défini par son étendue granulaire est optimisé (sans voir la répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire).

Cette formule est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent généralement à définir des courbes granulaires de référence.

Nous citerons pour exemple les méthodes de **BOLOMEY, FAURY, DREUX...** etc.

Dans le cas des bétons de sable, les constituants solides sont le sable, les fines d'addition et le ciment; les fines d'addition étant de dimensions voisines de celles du ciment.

L'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons ordinaires conduit généralement à des estimations du dosage des constituants déraisonnables. Il faut donc adapter la démarche de formulation pour ces bétons en repartant de la base et principalement à partir de la formule de **CAQUOT**.

I.2.7.2. Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

Dans cette étape, on va optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable. Pour ce faire, ces constituants sont séparés en deux fractions, les fines regroupant l'ensemble des grains de tailles inférieures à 80 μm et le sable couvrant l'étendue granulaire 80 $\mu\text{m}/D$ (D étant défini ici comme le diamètre maximal du sable).

Remarque: Les fines sont constituées de ciment, de la fine d'addition et de la fraction du sable inférieure à 80 μm , si la fine d'addition comporte des grains de taille supérieure à 80 μm , cette fraction se retrouve intégrée au sable.

Considérant l'étendue granulaire du sable, il est alors évident qu'il présente une porosité (PS) définie par la formule de **CAQUOT**, soit:

$$Ps = 0.75(0.08/D)^{1/5} \text{(en pourcentage volumique)} \quad (\text{I-3})$$

0,75: Est la valeur de la constante expérimentale qui donne la bonne estimation en terme de porosité.

Le dosage volumique optimal en fines cherchera à combler cette porosité afin d'optimiser la compacité de l'ensemble. A ce niveau, les fines complètent l'étendue granulaire du squelette solide.

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par [fines] le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80 µm et [v] le volume de vides associé à l'empilement de ces fines, CAQUOT a obtenu le résultat suivant :

$$[\text{fines}] = [V]$$

La porosité des fines est généralement proche de la valeur 50 %.

Le dosage optimal en fines est :

$$[\text{fines}] = 0.38(0.08/D)^{1/5} \text{ (I-4)}$$

La constante « 0,38 » a une précision de ± 0,10.

Cette formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la limite supérieure de l'étendue granulaire, on voit clairement que plus le diamètre D diminue plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif intermédiaire ciment seul.

I.2.7.3. Porosité et dosage en eau d'un béton de sable

Dans le béton, le squelette granulaire y compris les fines étant optimisé présente toujours une certaine porosité.

En admettant que les vides inter-granulaires se décomposent en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante, issue une nouvelle fois des travaux sur la compacité de CAQUOT:

$$(e+v)_{\min} = 0.8(d/D)^{1/5} \text{ (I-5)}$$

d/D: l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d, borne inférieure de l'étendue granulaire.

L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules.

Ainsi, dans le cas de mélange totalement défloculé, (d) peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin.

La valeur de (d) est donnée comme suit:

Si le mélange est défloculé par l'utilisation d'un adjuvant:

$$d=60/ f.\rho \text{ (mm)}(I-6)$$

Avec,

f: La finesse de Blaine des fines (cm^2/g)

ρ : La masse volumique des fines (g/cm^3).

Si le mélange n'est pas dé floclé, alors il faut prendre pour (d) une estimation de la dimension des floccs entre 0,020 et 0,025 mm.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas des bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires.

Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vides}] = k [\text{eau}] \text{ (l/m}^3\text{)}(I-7)$$

Avec, k compris entre 0,2 et 0,25.

En ce qui concerne l'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants, fines, eau et vides. Nous avons alors:

$$[\text{Sable}] = 100 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \text{ (l/m}^3\text{)}(I-8)$$

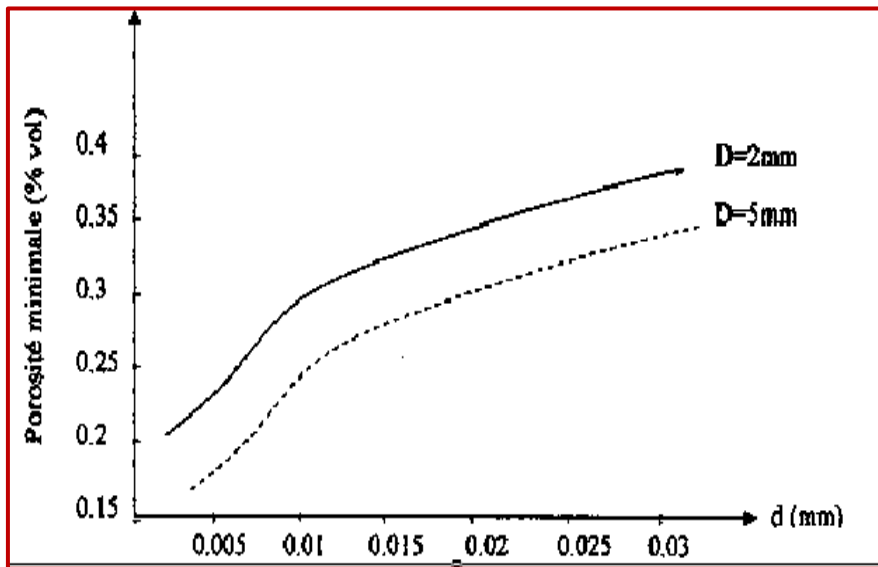


Figure I-6: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable (SABLOCRETE, 1994)

I.2.7.4. Estimation de la résistance en compression

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET (SABLOCRETE, 1994) a été proposée.

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad (\text{I-9})$$

K_f : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5;
 R_c : classe vraie du ciment (MPa);
 e : dosage en eau totale (l/m^3);
 V : air piégée (l/m^3);
 C : dosage en ciment (kg/m^3);
 R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$$K_1 = K_{cv} (CV/C) + K_{fs} (FS/C) \quad (\text{I-10})$$

Avec:

$$0.2 < K_{cv} < 0.4 \quad 2 < K_{fs} < 3.3 \quad K_1 \leq 0.5$$

$$K_2 = K_{fil} (Fil/C) \quad 0 < K_{fil} \leq 0.4 \quad K_1 < 0.2$$

K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv} , K_{fs} , K_{fil} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FiL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3)

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés (K_{cv} , K_{fs} et K_{fil}). Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente (**Guenoun, 2003**).

Ainsi d'autres paramètres pourraient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. L'activité de filler calcaire présente un optimum au-delà duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques (figure I-7).

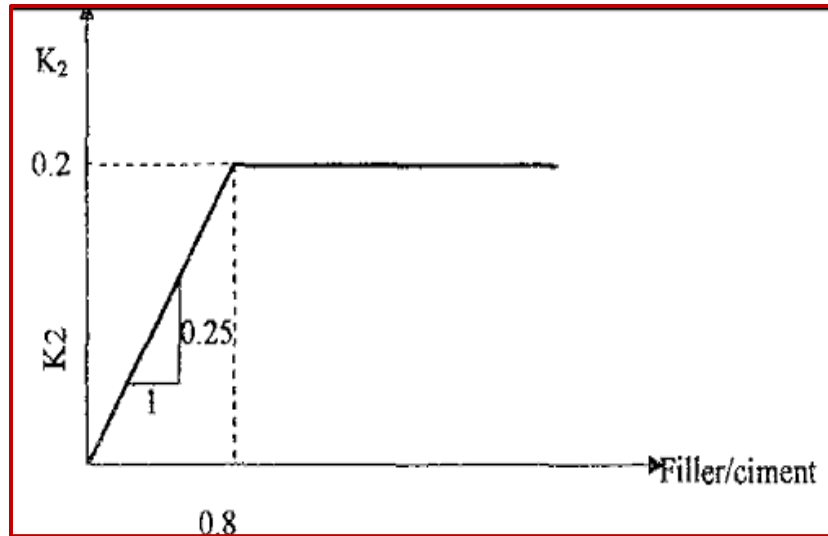


Figure I-7: Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) (SABLOCRETE, 1994)

Ainsi il y a d'autres paramètres qui s'ajoutent pour le dosage en fines, toutefois le dosage en fines est estimé en terme de compacité, ces fines regroupant le ciment, l'addition (filler calcaire, cendres volantes ...) et la fraction du sable inférieur à $80\ \mu\text{m}$, ainsi que l'optimum de la résistance serait atteint pour les dosages en ciment et en addition, solution du système suivant:

- Dosage en ciment + dosage en fines d'addition = dosage en fines.
- Dosage en fines d'addition / dosage en ciment = optimum d'activité.

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme.

I.2.8. Applications du béton de sable

Les applications du béton de sable concernent des domaines aussi large que le bâtiment et le génie civil, elles ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation du béton de sable, tant techniquement qu'économiquement.

Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable.

- **En raison de sa fluidité**

A la fabrication des pieux forcés, la réalisation de dallages auto nivellement, au renforcement de structure par projection.

- **En raison de sa faible tendance à la ségrégation**

A la réparation de fondation, au comblement de cavités, à une facile mise en œuvre sous l'eau.

I.2.9. Avantages et domaines d'application de béton de sable

Le béton de sable fait partie des nouveaux matériaux de construction, qui utilisent des ressources naturelles en sable, éliminant ainsi beaucoup d'obstacle qui se dressent comme entrave devant le développement et l'évolution de la construction.

Nombreuses sont les qualités de ce dernier, qui le place parmi les matériaux privilégiés de la construction, surtout dans certains domaines où les bétons classiques présentent des anomalies dans leurs exécutions (**Belferrag, 2006**).

Grâce aux propriétés spécifiques dont nous pouvons citer.

- Sa bonne qualité d'ouvrabilité, le béton de sable facilite le coulage des éléments fortement ferrailés, et dans les endroits dont l'accès est difficile.
- Sa composition granulaire de dimension faible, le béton de sable est surtout utilisé dans l'ornement et la finition des façades.
- Bonne homogénéité et cohésion due à sa granulométrie.

Le béton de sable comme matériau de construction est actuellement utilisé dans de divers domaines d'application et avec des divers procédés tels que : (**Belferrag, 2006**).

a. Bâtiment

Presque toutes les applications sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique.

b. Béton non vibrés

Les bétons de sable sont souvent des bétons fluides, utilisés notamment pour:

- La fabrication de pieux forés.
- La réalisation de dallages auto compactant ou auto nivelant.

c. Routes

L'utilisation du béton de sable dans la construction routière est une technique qui a vu le jour en Aquitaine (sud-ouest de la France) dans la première moitié des années 90, a été développée, dans un souci de préservation des ressources et de l'environnement dans les régions riches en sable présente aussi un intérêt économique majeur.

d. Projection

La projection de béton de sable se fait d'une manière très pratique dans les travaux de réparation en génie civil et dans la stabilisation des talus.

I.2.10. Fabrication et mise en œuvre

I.2.10.1. Malaxage

La réaction entre les différents composants, est d'autant plus complète que le mélange est homogène, trois étapes constituent le mode de fabrication des bétons de sable.

- L'homogénéisation du mélange à sec (ciment et sable) et l'addition pendant deux minutes environ à vitesse lente.
- Introduction de l'eau de gâchage au cours du malaxage, ce qui a pour but de mouiller le mélange et de faciliter la mise en place, ceci pendant deux minutes à vitesse rapide, le fluidifiant est ajouté dans l'eau de gâchage après que 50 à 70 % de l'eau ait été introduite,
- L'homogénéisation est réalisée à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 40 litres, pour les essais de formulation et de caractérisation.

I.2.10.2. Coulage et vibration

Le mélange préparé est mis en place par coulage et vibration, le coulage se fait en deux temps, le moule est rempli aux trois quarts et il est soumis à une vibration jusqu'à l'apparition d'un léger ressuage, ensuite, le moule est rempli totalement et la vibration reprend pendant une minute environ (Malou, 2007).

I.3. Valorisation des déchets de carrières comme matériaux de construction

I.3.1. Introduction

Devant la demande croissante des matériaux de construction et l'épuisement des ressources naturelles et en réponse aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est indispensable de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de recyclage et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

Un déchet est une substance ou un produit mis en rebut car il est usé, contaminé ou abîmé; inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, ce dernier constitue un réel problème, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités (Azzouz et al., 2000).

En Europe, plus de 25% des déchets proviennent de la démolition ou de la rénovation d'immeubles et de ses rebuts qui encombrant les décharges publiques. On estime que seulement 30% des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables (Desmyter.J et al., 2004).

La valorisation des déchets de démolition connaît un développement aussi important et le taux de recyclage a atteint dans certains pays comme les Pays-Bas 73%. Au Québec l'importante hausse du taux de recyclage (18 % à 42 % entre 1988 et 2002) est allée de pair une

augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg à 870 Kg /an/personne.

En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne (PNAE-DD).

Au Portugal, il s'estime que, annuellement, à peu près 4 à 20 millions de tonnes de résidus sont créés, en comptant ceux qui se reportent aux excavations et construction de routes.

La Turquie et l'Espagne, situées dans la ceinture alpine-himalayenne possèdent des dépôts riches en marbre. Il y en a plus de 5000 usines de transformation du marbre en Turquie. À la suite des millions de tonnes de marbre produites chaque année en Turquie, les déchets de ces usines, augmentent chaque année, et atteignent des millions de tonnes (Alyamac and Aydin, 2015).

En Espagne, plus de 700 000 tonnes de déchets de l'industrie du marbre ont été déversés dans les décharges (Valdez et al., 2011).

Un autre exemple est l'Égypte, qui a la même situation et la même alarme concernant les déchets de marbre que l'Espagne. Bien que l'Égypte soit le septième exportateur et le cinquième producteur mondial de l'industrie du granit et du marbre, l'Égypte produit plus de 2 millions de tonnes de déchets de marbre. Ces montants indiquent que le monde a accumulé une grande quantité de déchets de marbre, entraînant un problème environnemental important (Aliabdo et al., 2014).

L'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment. Face à la gravité des problèmes environnementaux dus à la surexploitation des ressources, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 millions de dinars, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) (Plan National d'Actions).

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance et la durabilité. Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance et la durabilité des matériaux durcis. Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution pour optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales) et leurs actions sur les propriétés des bétons.

Dans cette étude on s'intéressera à la valorisation des déchets de carrières dans un béton de sable avec deux types de sables.

I.3.2. Déchets de carrières

Les déchets de carrières sont des sous-produits de fabrication des granulats au niveau des différentes carrières d'exploitation des gisements rocheux. Les travaux d'extraction, de concassage et de criblage produisent des éléments déclassés de calibres confondus qui sont jetés ou stockés à ciel ouvert.

On peut distinguer les carrières par l'usage de la roche qui en est tirée:

- Matière première industrielle : calcaire pour les cimenteries, argile pour la terre cuite, etc.;
- Roche ornementale et de construction : ardoise, pierre, marbre, granit pour les constructions, pierres tombales, etc.;
- Granulat : graviers et sables utilisés par le bâtiment et les travaux publics.

On peut aussi distinguer les carrières par leur mode d'extraction:

- Carrières de roche massive: extraction d'une couche géologique de roche plutôt homogène et compacte par abattage à l'explosif, au sciage et plus rarement par ripage (raclage et polissage);
- Gravière et sablière: extraction de dépôts sédimentaires, alluvionnaires ou marins de sables ou de graviers.
- Il existe des carrières sous-marines (sable, gravier) et souterraines.

Parmi les déchets de carrières, sujet de revalorisation on peut citer: les fillers calcaires. Les fillers de calcaire, ce sont des calcaires finement divisés, obtenus par broyage de roche calcaire, de couleur blanche, l'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage, . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration).

L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse, si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

L'addition des fillers calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable.

Les fillers peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton.

I.3.3. Valorisation des déchets de marbre comme matériaux de construction

I.3.3.1. Introduction

Le marbre algérien est exploité par l'entreprise nationale de marbre (**ENAMARBRE**), l'Algérie compte 03 gisements de carrières de marbre / dont on a les carrières à blocs, carrières de dérivés, (**ENAMARBRE, 2015**).

I.3.3.2. Les carrières à blocs

a- Le gisement d'Onyx d'Ain Smara

Est situé au lieu-dit Kef El Ahmar distant de 5 Km du chef-lieu de la commune d'Ain Smara wilaya de Constantine et à 15 Km à la ville de Constantine, l'accès de la carrière est assuré par une piste carrossable non goudronnée d'une longueur de 01 Km. La nature de la roche

est l'Onyx jaune doré, c'est un gisement constitué d'un seul filon, de dimensions, 600m de longueur et 12m de largeur et d'une profondeur de 70m (figure I-8). Actuellement, c'est une carrière non opérationnelle.



Figure I-8: Le gisement d'Onyx d'Ain Smara

b-La Carrière de Mahouna

Est située à environ 6 Km au Sud-Ouest de la ville de Guelma. Les filons de marbres sont encaissés dans le massif de Mahouna qui est caractérisé par un relief dont les altitudes varient entre 400 et 700 m.

Le gisement d'Onyx (figure I-9) a été étudié par la **SONAREM** (mission Roumaine) en 1971-1973 qui a réalisé 9 sondages avec une profondeur variant de 12 à 65m. Dans les calcaires d'âge **EOCENE** qui constituent le massif Bouennar sont encaissés plusieurs filons de calcite (Onyx) dont notamment un filon de direction Nord – Sud qui occupe la partie Ouest du massif présentant une longueur de 1 Km environ et une largeur de 30 à 50m.

Les calcites de ces filons ont des couleurs très variées, blanches, jaunes à rouges disposées en bandes minces et parallèles épaisses de quelques millimètres à plusieurs centimètres, ces calcites ont l'aspect de l'Onyx. Les réserves en onyx du secteur Bouennar (**Mahouna**) sont de l'ordre de 565.815 m³; les réserves restantes sont de 359.000 m³.



Figure I-9:Carrière de Mahouna(Guelma).

c-La Carrière de marbre de KRYSTEL

Exploitée par **ENAMARBRE** est encaissée dans le massif de **DJEBEL OUROUSSE** qui culmine à 630m d'altitude; cette dernière est située à environ 45Km au Nord-Est de la ville d'Oran et à 7 Kilomètres au Nord du village de Sdi Ben Yebkaauquel elle est reliée par une piste carrossable ayant une pente moyenne de 8 à 10 %. Les réserves uniquement pour les marbres rouge et jaune sont 6.890.429 m³.

A environ 700m au Sud-Ouest de la carrière de marbre jaune se trouve la station de concassage qui traite des marbres roses très fissurés à partir de la carrière à moellons qui se trouve à proximité (figure I-10). Les blocs de marbre de KRYSTEL rose, jaune et rouge sont traités au niveau de l'usine de marbre de Sig.

Des blocs de marbre rose, rouge et jaune sont également exportés en Espagne et surtout l'Italie. Une station de concassage de dérivés de marbre d'une capacité de production de 80.000 tonnes/an.

Les dérivés de marbre sont commercialisés au niveau du marché national. On note une grande demande pour les blocs de marbre rouge, rose et jaune par le marché international.



Figure I-10: La Carrière à blocs de marbre de KRYSTEL (Oran)

I.3.3.3. Les Carrières de dérivées

a-La carrière d'Agoulmine

Se trouve à proximité du village d'Agoulmine à Tizi-ouzou à Ait-khelili (Tizi-ouzou) son marbre de couleur gris et blanc (figure I-11). Ses réserves restantes environ 31,5 millions de tonnes; produits réalisés sont les dérivés de marbre avec les granulométries 0/80 microns, 0/3, 3/8, 8/15, marché important pour la poudre de marbre (principal client ONAB).



Figure I-11: La carrière des dérivés de marbre d'Agoulmine (Tizi-ouzou)

b-La Carrière de Tadjra

Se trouve à environ 60Km de Nord Ouest de chef-lieu de la wilaya de Tlemcen et à 26Km de ville de Remchi (figure I-12). Son marbre et le blanc, noires réserves sont 2.177.456 tonnes. Avec une production des granulats de marbre de couleur gris-clair et blanc rosâtre. De granulométrie : poudre 0-1 et 0-3 et Grains : 1-3, 3-8 et 8-15.



Figure I-12: Carrière de de dérivés de Tadjra (Tlemcen)

c-La Carrière de Chatt

Se trouve à environ 25Km à l'Est de la ville de Skikda (figure I-13), dont 5Km de piste non goudronnée, commune de Fil-Filawilaya de Skikda. On y trouve le marbre blanc et le marbre gris et gris foncé, les réserves restantes à 6,7 millions de tonnes.

L'exploitation d'un gisement de marbres fissurés pour la production de moellons qui seront traités au niveau d'une station de concassage pour la production de dérivés de marbre présentant les granulométries suivantes, poudre de classe 0/1, grains de classe 1/5, 5/10 et 10/18. Le grain de marbre blanc de Chatt est très demandé sur le marché (3400 DA la tonnes).



Figure I-13: Carrière des dérivés Chatt (Skikda)

I.3.3.4. Carrières de marbre de Fil-fila (Skikda)

L'étude faisant l'objet de la thèse, est basée sur l'utilisation des déchets de marbre blanc sous sa forme fine (sable) (figure I-14); c'est une poudre déclassée jetée et exposée aux intempéries de la carrière à blocs de Fil-fila (figure I-15) qui se trouve à 25km à l'Est de la ville de Skikda au Nord-Est de l'Algérie.

Outre le sable, et le déchet de marbre, on trouve aussi les fillers calcaires, un sous-produit de l'industrie des granulats, qu'on trouve en abondance dans les carrières.

Les déchets de marbre de cette carrière sont les blocs, les chutes et les moellons ayant différentes formes géométriques et poudres déclassées. Pour l'année 2007, le taux de déchet est de 56% de la production pour la carrière à blocs et 19% pour la carrière des dérivés de Chatt (figure I-16). (Hebhoub et al., 2011), ce déchet occupe un espace énorme au détriment de l'espace vert, en plus et du fait de sa finesse il s'envole et pollue l'air qu'on respire et contamine les eaux souterraines, par son infiltration dans le sol, avec la contribution des eaux pluviales.



Figure I-14: Poudre de marbre déclassée



Figure I-15: Carrière à blocs de Fil-fila



Figure I-16:Carrière de dérivéesEchatt de Fil-fila

La production de la carrière des dérivés d'Echatt depuis l'an 2000 est portée sur le tableau I-2

Tableau I-2:Production de la carrière des dérivés

Année	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Production (tonnes)	27020	29840	43981	42465	45699	49700	53327	47400	60822	53373
Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Production (tonnes)	52600	48380	48000	83000	73120	69780	89480	73851	52200	22540

Le pourcentage des déchets de marbre est estimé de 20% de la production, par exemple pour l'année 2017, l'unité a produit 52 200 tonnes, donc un taux de déchet de $52\ 200 \times 0,2 = 10\ 440$ tonnes.

Il est noté que 30% de la production à chaque fin d'exercice est considérée fatale, puisqu'elle présente des défauts de fabrication (poudre de marbre)

En 2017 la totalité de la production fatale est de l'ordre de $10\ 440 + 52\ 200 \times 0,3 = 26\ 100$ tonnes.

I.3.3.5.Optique de l'entreprise envers la gestion des déchets de marbre

- Pour les 20% des déchets issus du processus de fabrication, l'entreprise a envisagé acquérir une station de lavage qui travaille en aval pour laver les moellons qui donneront la production;
- Pour le problème de la production fatale (poudre de marbre) produite à un taux de 30% à 35%, l'entreprise pour améliorer la qualité de la poudre, a voulu injecter une machine supplémentaire au processus de production soit un crible à disque qui enlève la marne des moellons;

Les différents types de déchets de marbre vis-à-vis leurs granulométries:

- 20% de déchets sont constitués des argiles et quelques déchets de marbre dont la granulométrie voisine (5 à 15) mm
- la production fatale (poudre de marbre) sa granulométrie est de 0 à 1,5 mm

I.4. Travaux antérieurs

Plusieurs axes de recherche étaient basés sur l'emploi du déchet de marbre; sous plusieurs formes; poudre, sable et granulat; dans le mortier, dans le ciment et dans les différents types de béton.

Récemment, l'utilisation de la poudre de marbre comme matériau de remplacement a été étudiée. **Agarwal et Gulati (2006)** ont démontré que la présence de poudre de marbre dans la matrice cimentaire améliore la résistance à la compression au jeune âge. **Topçu et al. (2009)** ont précisé l'effet filler de la poudre de marbre.

La maniabilité des bétons n'est pas affectée mais la résistance mécanique diminue pour une grande quantité de poudre de marbre (200 kg/m³) (**Tebbal, 2017**). Les recherches de **Messaoudene et al. (2011)** montrent que, la substitution du ciment Portland par 10% de filler de marbre donne des bétons avec une résistance mécanique en compression à 28 jours supérieure à 50MPa.

Hebhoub et al.(2010) a étudié l'utilisation du déchet de marbre dans le béton hydraulique comme substituant dans le volume du sable avec les taux de 25-50-75 et 100% les propriétés du béton frais et du béton durci ont été améliorées en les comparant à celles du béton témoin et au béton à 100% de déchet de marbre.

Hebhoub et al.(2014) a étudié l'introduction de sable de déchet de marbre dans la composition du mortier. Les résultats ont montré que le déchet de marbre a amélioré la densité, la résistance à la compression à jeune âge, et la résistance à la traction. Le retrait a été diminué.

Omar. M.O.et al. (2012), a étudié les propriétés mécaniques du béton à l'état frais et l'état durci, en remplaçant partiellement le sable avec 25%, 50%, 75% en premier temps, et par l'ajout de la poudre de marbre avec les proportions de 0, 5%, 10%, 15%, en deuxième temps.

Meilleures performances ont été obtenues quand le déchet de calcaire et la poudre de marbre ont été mélangés. La résistance à la compression a augmenté de 7% quand on a utilisé 50% de calcaire avec le marbre, idem pour la résistance à la traction par flexion, spécialement avec 15% d'ajout de la poudre de marbre. Tandis que les résistances ont diminué avec au-delà de 50% du taux de substitution.

Aliabdo et al. (2013) ont testé l'effet de substitution du ciment et du sable par la poudre de marbre dans le béton, il a utilisé les taux de 0%, 5%, 7.5%, 10% et 15% de la masse avec un rapport (eau/poudre) et (eau/ciment) égaux à 0.5 et 0.4 respectivement pour le remplacement du ciment et le remplacement du sable. Une amélioration des propriétés physico-mécaniques a été enregistrée, surtout avec le remplacement du sable. La poudre de marbre avait un effet filler dans le béton sans influencer le processus d'hydratation.

Rodrigues et al.(2014) ont étudié les propriétés mécaniques d'un béton structural contenant des agrégats très fins venant du découpage des plaques de marbre à des taux de 0%, 5%, 10% and 20% du volume total du ciment, avec l'ajout de superplastifiants; les résultats ont montré que ces propriétés avaient tendance de diminuer, mais elles se sont améliorées avec l'utilisation de superplastifiant et 10% de granulats fins de marbre.

Gulden.C.U. et al.(2015) ont testé les propriétés d'un béton durci produit avec la poudre de déchet de marbre. Il a été trouvé que l'utilisation de ce déchet comme liant ou granulat fin a positivement affecté les propriétés du béton durci. Mais, les propriétés mécaniques du béton auto-plaçant ont diminué.

Gulden.C.U. et al. (2016) ont réalisé une étude a été faite sur la durabilité d'un béton à base de déchet de marbre comme granulat ou ajout minéral dans un béton conventionnel ou un béton auto-plaçant, les résultats ont montré que l'absorption d'eau; la perméabilité; la résistance à la pénétration des chlorures et les attaques des sulfates se sont améliorées.

Manpreet.S. et al.(2017) ont prospecté l'effet du remplacement partiel du ciment par la boue du déchet de marbre, Il a été découvert une amélioration des propriétés mécaniques quand 15% de boue de marbre séchée utilisée pour le remplacement du ciment. La vitesse de propagation du son (essai Ultrasonique), la dureté de surface et les essais de durabilité ont donné de meilleurs résultats.

Corinaldesi et al. (2009) ont utilisé la poudre de marbre dans le mortier et dans le béton, comme substituent de sable à 10% et l'ajout d'un superplastifiant la résistance à la compression à 28 jours était bien meilleure de celle obtenue avec le béton témoin, sachant qu'ils avaient la même ouvrabilité. Dû à son effet filler la poudre de déchet de marbre a positivement affecté la résistance à jeune âge.

Tayfun.U.O. et al.(2014) ont étudié l'utilisation de déchet de marbre et les agrégats recyclés dans le béton auto-plaçant pour la durabilité, la maniabilité des BAP (comme la capacité d'écoulement, la résistance au blocage et la ségrégation est augmentée par l'utilisation de morceaux de déchets de marbre au lieu du calcaire).

De plus, des différences importantes n'ont pas été observées dans les propriétés mécaniques du BAP en utilisant le déchet de marbre et les agrégats recyclés. Pour cette raison, la pierre de marbre concassée et les agrégats grossiers recyclés qui ont été obtenus en utilisant une énergie inférieure à celle requise pour l'obtention du calcaire, peuvent être utilisés dans le BAP.

Hebhoub et al.(2019) ont étudié les déchets de marbre dans les mortiers, ils ont procédé à la substitution en masse du sable, dans la composition de mortier aux taux de 5%, 10%, 15% et 20%; les paramètres de durabilité ont été alors testés, d'après les résultats obtenus on a pu constater que le déchet de marbre a amélioré les résistances mécaniques, l'absorption par immersion est augmentée, la perte en masse est augmenté surtout autour de 15%, en conséquent le retrait est aussi augmenté.

Kursat.E.A. et al.(2017) ont étudié le développement d'un éco-coefficient du béton auto-plaçant à base de déchet de marbre à l'aide de la méthode de la réponse de surface, en conséquence, une CSC éco-performante a été obtenue avec des rapports eau-ciment inférieurs à 0,55 et des ratios de poudre de marbre-ciment jusqu'à 0,6.

Sadek et al.(2016)de nombreux chercheurs ont étudié les relations entre la poudre de marbre et les propriétés fraîches, durcies et de durabilité du BAP. L'utilisation de la poudre de déchet de marbre dans les bétons auto-plaçants comme additifs minéraux améliore ses propriétés mécaniques et de durabilité

Topçu.I.B.et al.(2009) ont étudié l'effet de la teneur en marbre comme filler dans le béton auto-plaçant, il a été conclu que l'ouvrabilité du BAP frais n'a pas été affectée jusqu'à 200 kg/m³ de teneur en déchet de marbre. Cependant, les propriétés mécaniques du BAP durci ont diminué, spécialement juste au-dessus de 200 kg/m³.

Hasan.S.(2016) a étudié le recyclage des déchets de marbre dans le béton, en plus de l'amélioration des propriétés mécaniques du béton, la poussière de marbre avec un taux de remplacement du ciment de 5% à 10% réduit les émissions annuelles mondiales de CO₂ de 12% et réduit les coûts de 40 à 33 US \$ / m³. Sur la base des études examinées, des équations mathématiques quantifiant le remplacement du ciment par de la poussière de marbre et l'utilisation d'agrégats de poussière sont dérivées dans cet article.

Tennich.M.(2017) a trouvé que le béton auto-plaçant à base de déchet de marbre; a une bonne résistance aux attaques de sulfate externe, même en cas d'exposition sévère au sulfate avec une solution de sulfate de sodium, suite à l'étude du comportement du béton auto-compactant fait de marbre et de déchets de carreaux exposés à une attaque de sulfate externe.

Talah et al. (2015)ont inspecté l'influence de l'ajout de la poudre de marbre sur le comportement du béton à hautes performances BHP,l'analyse des résultats expérimentaux sur du béton à 15% de poudre de marbre ayant un module de finesse de 11500 cm²/g, dans un environnement de chlorure, a montré qu'il contribue positivement à la perfection de ses caractéristiques mécaniques, sa durabilité vis-à-vis de la migration les ions chlorure et la perméabilité à l'oxygène. Sur la base des expériences effectuées, il a été conclu que la poudre de marbre convient pour la formulation de bétons à hautes performances (BHP) et que leurs propriétés sont significativement meilleures par rapport au béton de référence.

Bacarji et al.(2013) l'objet de cette étude était sur les perspectives de la durabilité et la valorisation des déchets de marbre et de granite comme fillers dans le béton.

L'analyse chimique et la distribution granulométrique ont montré que le déchet de marbre et granite, est un matériau non réactif et peut agir comme agent de remplissage. Une analyse numérique a été réalisée dans le but de calculer la surface de contact entre l'enveloppe externe en expansion des particules de ciment hydratant et la surface des charges marbre et granite. L'analyse a montré une forte corrélation avec la zone de contact et a également confirmé que ce déchet peut être utilisé comme un substitut durable pour le ciment. Profondeur (profondeur).

Djebien.R. et al. (2015) ont étudié l'effet des fines de déchet de marbre sur les propriétés rhéologiques et durcies du béton de sable, il a été conclu que les fines de marbre ont amélioré, par le renforcement de l'adhérence, les meilleures performances mécaniques ont été obtenues par 10% du taux de substitution.

I.5. Conclusion

Cette étude entre dans le cadre d'une politique de récupération et revalorisation de quelques déchets de carrières dans le béton de sable. Les déchets qu'on utilisera sont: le sable de déchet de marbre et les fillers calcaires.

Nous avons rapporté dans ce chapitre, que l'utilisation des bétons de sable dans divers domaines dépend:

Des arguments technico-économique contribuant à favoriser son développement. Entre autre sa facilité de bétonnage qui conduit à une bonne exécution des ouvrages et leurs bons façonnages.

De la composition des bétons de sable qui est totalement différente de celle d'un béton courant.

D'après les travaux de recherches réalisés à travers le monde, le déchet de marbre a prouvé son efficacité dans les différents types de béton, par l'amélioration à la fois des propriétés physiques, mécaniques et durabilité.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux

II. Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente l'ensemble des matériaux utilisés dans l'étude, leurs provenances et leurs propriétés (physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques). Ces matériaux sont : le ciment, les différents sables, les fillers calcaires, l'adjuvant et l'eau.

II.2. Matériaux utilisés

Pour la réalisation de ce travail nous avons utilisé les matériaux suivants:

- Un ciment CEM I de classe 42.5 (avec un ajout calcaire) provenant de la cimenterie d'Ain Kbira –Sétif.
- Deux types de sable ordinaire:
 - * Sable de dune SD provenant des gisements d'Oued Zhor -Skikda.
 - * Sable de carrière SC provenant de la carrière de Ben Brahim- Constantine.
- Sable de déchets de marbre SM de la carrière de marbre de Fil-fila –Skikda.
- Fines calcaires F provenant de la carrière de Ben Azzouz-Skikda.
- Adjuvant, super-plastifiant (SP).
- Eau du robinet pour gâchage (E).

II.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans l'étude, est un CEM I de classe 42.5 à faible teneur en C3A provenant de la cimenterie d'Ain Kbira –Sétif (figure II-1).



Figure II-1: CEM I d'Ain Kbira –Sétif.

Les essais effectués sur le ciment sont:

- La densité qui est de 3.220g/cm^3 a été déterminée à l'aide de densimètre le Chatelier en utilisant l'acétone (figure II-2).



Figure II-2: Mesure de la densité

-La surface spécifique de Blaine est de $3025 \text{ cm}^2/\text{g}$ a été déterminée conformément à la norme EN 196-1, par la méthode de perméabilité à l'air (figure II-3) en observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment ou de fillers compactés dans la cellule du Perméabilimètre de Blaine.



Figure II-3: Mesure de la surface spécifique de Blaine

L'analyse chimique se fait par diffraction par rayon «X» et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau II-1, la teneur des phases anhydres du ciment est calculée à partir de l'analyse du ciment en appliquant la méthode de Bogue.

Tableau II-1: Composition chimique et minéralogique du ciment

Composants	Pourcentage %	Composants	Pourcentage %
CaO	63,69	PAF	0,70
Al ₂ O ₃	4,55	CaO Libre	0,75
Fe ₂ O ₃	5,03	MS	0,75
SiO ₂	20,90	C3S	67,35
Na ₂ O	0,18	C2S	9,42
K ₂ O	0,33	C3A	3,33
Cl	0,001	C4AF	16,20
SO ₃	2,08	--	--

Les caractéristiques physiques et mécaniques obtenues sur pâtes et mortiers sont données par le tableau II-2.

Tableau II-2 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

Caractéristiques			Valeurs
Temps de début de prise			185min
Temps de fin de prise			285min
Résistance à la flexion (MPa)	2jours	7jours	28jours
	3.60	6.10	7.90
Résistance en compression (MPa)			49.8
	17.9	30.4	

II.2.2. Sables ordinaires

Nous avons utilisé deux types de sable ordinaire, existants dans la région Nord-Est de l'Algérie.

- Un sable de dune SD de classe 0/1 de nature roulée provenant de Oued Z'hor à l'Ouest de Skikda
- Un sable de carrière de classe 0/3 de nature concassée de la carrière Ben Brahim de Constantine.

Les propriétés physiques sont représentées dans le tableau II-3.

Tableau II-3: Caractéristiques physiques des sables ordinaires

Caractéristiques	Sable de dune 0/1	Sable de carrière 0/3
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,52	1,45
Masse volumique réelle (g/cm^3)	2,591	2,614
Equivalent de sable (propreté) (%)	86,30	60
Absorption d'eau (%)	3,35	2,01
Module de finesse M_f	1,95	2,93
Valeur au bleu de méthylène VB	0,7	0,8

Les propriétés chimiques sont données par le tableau II- 4.

Tableau II-4 : Composition chimique des sables ordinaires

Composant	Sable de dune (%)	Sable de carrière (%)
CaCO₃	8,80	82,80
CaO	-	55,45
Cl⁻	0,21	0,000
Al₂O₃	-	0,18
Fe₂O₃	-	0,08
SiO₂	95,21	0,33
MgO	-	0,25
Na₂O	-	0,080
K₂O	-	0,020

D'après le pourcentage SiO_2 le sable de dune est siliceux, alors que le sable de carrière est de nature calcaire car il contient une grande quantité de carbonates (82,80%) ce qui confère un bon collage entre le ciment et les granulats.

Les courbes granulométriques des deux types de sable sont représentées sur la figure II-4.

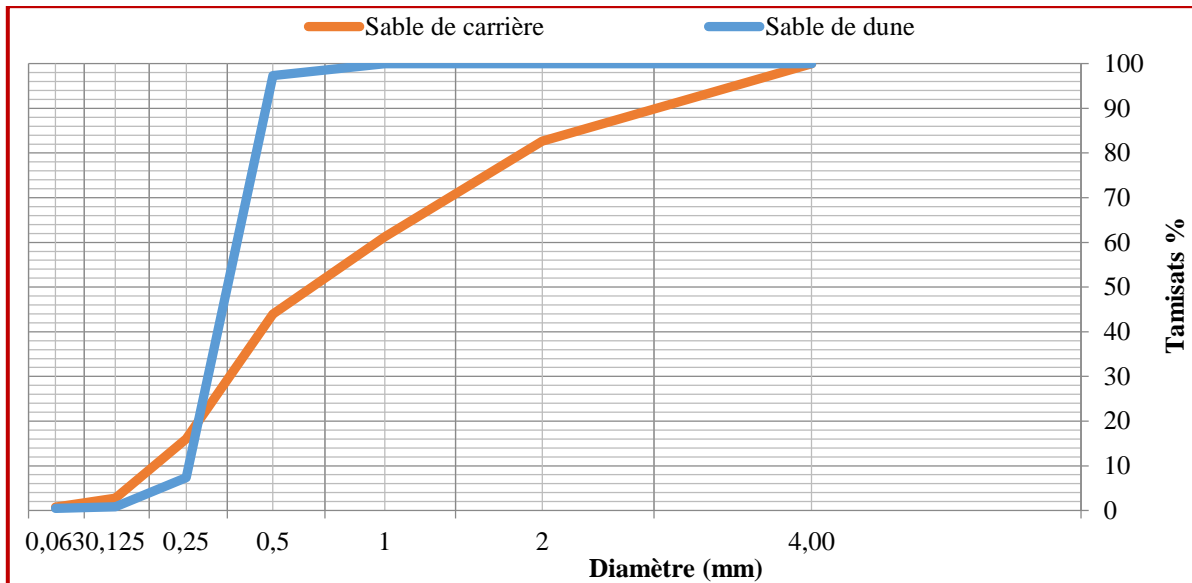


Figure II-4: Analyse granulométrique des sables ordinaires

D'après l'analyse granulométrique (figure II-4), le sable de dune présente une granularité continue et le sable de carrière est un sable de granularité normale

II.2.3. Sable de déchets de marbre

Le sable de déchets de marbre SM (figure II-5) de la carrière de marbre de Fil-fila –Skikda, est un poudre déclassé (poudre jeté soumise aux intempéries).

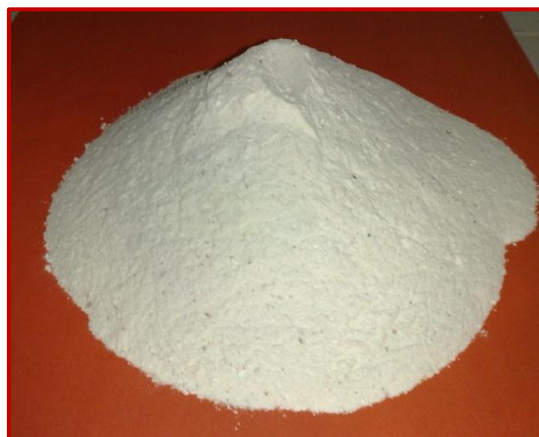


Figure II-5: Sable de déchet de marbre

Les caractéristiques physiques de ce sable sont données par le tableau II-5.

Tableau II-5 : Caractéristiques physiques de sable de déchets de marbre

Caractéristiques	Sable de déchet de marbre
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,680
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2,666
Equivalent de sable (propreté) (%)	67,10
Absorption d'eau (%)	5
Module de finesse M _f	1,79
Valeur au bleu de méthylène MB	0,6

En analysant les résultats reportés sur les deux tableaux (Tableau II-3, Tableau II-5) on peut dire que :

- La masse volumique réelle des trois sables indique qu'ils sont des sables courants
- Pour la propreté, on peut dire que le sable de déchet de marbre et le sable de carrières sont légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante et on ne craint pas particulièrement le retrait, contrairement au sable de dune qui est propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
- Le module de finesse indique que le sable de dune et le sable de déchet de marbre contiennent une bonne quantité d'éléments fins, tandis que le sable de carrière est normal.
- La valeur au bleu de méthylène indique un faible pourcentage en fines argileuses, ce qui convient le mieux au bon béton.

La composition chimique obtenue par diffraction par rayon X est donnée par le tableau II-6.

Tableau II-6: Composition chimique du sable de déchet de marbre

Composant	Sable de déchet de marbre	Composant	Sable de déchet de marbre
CaCO₃	98	Fe₂O₃	0,04
CaO	55,29	SiO₂	0,15
SO₄⁻	-	MgO	1,03
Cl⁻	0,24	Na₂O	0,01
Al₂O₃	0,08	K₂O	0,01

On constate que le sable de déchet de marbre est très riche en CaCO₃ donc il est de nature calcaire.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont illustrés par la figure II-6.

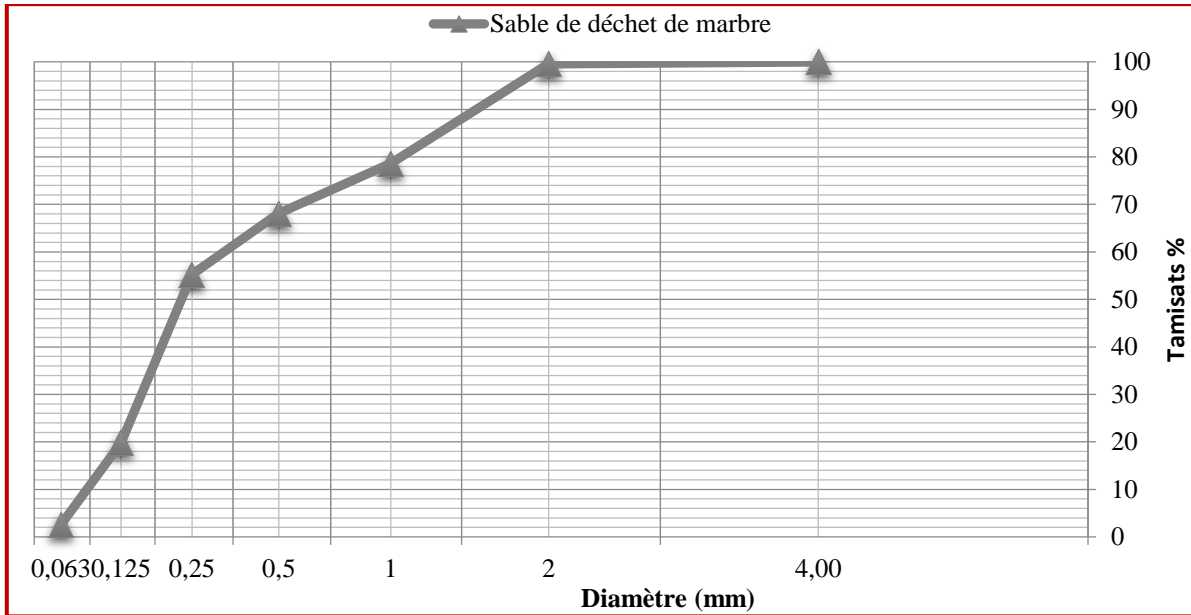


Figure II-6: Courbe granulométrique du sable de déchets de marbre

D'après l'analyse granulométrique du sable de déchet de marbre on peut dire qu'il est un sable à majorité de grains fins.

Les courbes granulométriques des trois sables sont données par la figure II-7.

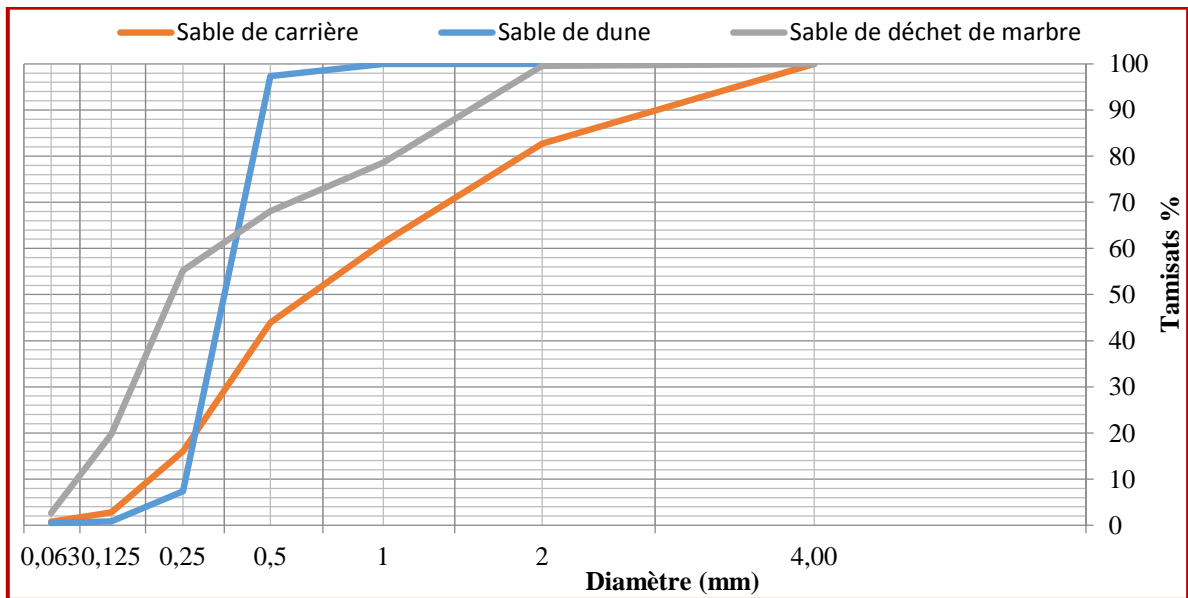


Figure II-7: Courbes granulométriques du sable de déchets de marbre, sable de carrière et le sable de dune

La distribution granulaire du sable de déchet de marbre est comparable, mais avec des pourcentages plus élevés, à celle du sable de carrière, elle est bien étalée, or que le sable de dune présente une distribution presque verticale et contient beaucoup d'éléments entre 0,25mm et 0,5mm.

II.2.4. Fines calcaires

Ce sont des calcaires finement divisés, obtenus par broyage de roche calcaire, de couleur blanche, provenant de la carrière de Ben Azzouz à l'Est de Skikda. Le pourcentage de passant au tamis 80µm est supérieur à 70%.

Les fines calcaires présentent une masse volumique apparente de 1.050g/cm³ et une masse volumique réelle de 2.740 g/cm³.

Les propriétés chimiques sont représentées dans le tableau II-7.

Tableau II-7: Analyse chimique des fines calcaires

Composant	Fillers calcaires	Composant	Fillers calcaires
CaCO ₃	84,60	Fe ₂ O ₃	0,01
CaO	55,80	SiO ₂	0,14
SO ⁻ ₄	-	MgO	-
Cl	0,21	Na ₂ O	0,01
Al ₂ O ₃	0,01	K ₂ O	0,01

Nos fines calcaires contiennent majoritairement des carbonates, elles sont de nature calcaire, ce qui accélère l'hydratation du C3S par la formation du carbo-aluminate de calcium qui contribue à l'augmentation des résistances mécaniques au jeune âge.

II.2.5. Adjuvant

Pour une meilleure ouvrabilité du mélange, nous avons employé un adjuvant super plastifiant haut réducteur d'eau « Polyflow SR5400 », sous forme de liquide marron clair (figure II-8).



Figure II-8: Adjuvant Polyflow SR5400

Les plastifiants réducteurs d'eau, ont un rôle double, ils permettent à la fois d'offrir au béton une consistance humide et la possibilité de réduire la quantité d'eau, la résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. Ils se caractérisent souvent par un effet secondaire « retardateur de prise » marqué lorsqu'on les utilise à un dosage élevé.

Les propriétés de ce type d'adjuvant sont mentionnées sur le tableau II-8.

Tableau II-8: Propriétés physiques et chimiques de l'adjuvant

Propriété	Valeurs
Densité	1,07 ± 0,02
pH	5 ± 1
Teneur en ions Cl	≤0,1%
Teneur en Na ₂ O	éq ≤ 2,5%
Extrait sec	30 ± 1 %

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de 28C°. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II-9, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes NF P18-404.

Tableau II-9: Analyse chimique de l'eau

Cl mg/l	pH	T°	Salinité	TDS mg/l	Conductivité Us/cm	Observation
0,1	7,3	28	0,2	297	541	Turbidité: 1,44ntu Eau de bonne qualité chimique

II.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les matériaux utilisés dans l'étude les propriétés des sables ordinaires, les fines calcaires et le sable de déchet de marbre, ensuite nous avons donné les principaux résultats des essais de caractérisation des constituants des différentes compositions à tester. D'après les résultats obtenus nous avons tiré les observations suivantes:

- le sable de dune présente une granularité continue et le sable de carrière est un sable de granularité normale tandis que le sable de déchet de marbre à majorité de grains fins.
- Le sable de dune est le plus fin, vient après le sable de déchet de marbre puis le sable de carrière.
- Le sable de dune est siliceux, alors que le sable de carrière comme le sable de déchet de marbre sont de nature calcaire, ce qui confère un bon collage entre le ciment et les granulats.
- La masse volumique réelle des trois sables indique qu'ils sont des sables courants.
- Pour la propreté (équivalent de sable), on peut dire que le sable de déchet de marbre et le sable de carrière sont légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante et on ne craint pas particulièrement le retrait, contrairement au sable de dune qui est propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

- La valeur au bleu de méthylène des trois sables indique un faible pourcentage en fines argileuses, ce qui convient le mieux au bon béton.
- Nos fines calcaires contiennent majoritairement des carbonates, ce qui accélère l'hydratation du C3S par la formation du carbo-aluminate de calcium qui contribue à l'augmentation des résistances mécaniques au jeune âge.

On peut en conclure que les caractéristiques physico-chimiques du sable de déchet de marbre conviennent à la fabrication d'un béton, et l'ajout de fines calcaires dans la formulation de ce dernier améliorera ses caractéristiques mécaniques.

Chapitre III

Programme expérimental et méthodologie d'essais

III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on expose le programme expérimental, la méthode de formulation, une description détaillée des essais expérimentaux, la préparation des mélanges et la définition des paramètres fixes et variables de l'étude.

Dans le but de mettre en évidence l'influence de la présence du sable de déchet de marbre à différents dosages sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable et son comportement en milieux agressifs (attaques par les acides, les bases et les chlorures), nous avons fait appel à une série d'essais en procédant à la substitution du sable ordinaire par le sable de déchet de marbre, et mesurer les paramètres physiques, mécaniques, les variations dimensionnelles et enfin évaluer la vulnérabilité des mélanges obtenus, vis-à-vis les milieux agressifs.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction LHC de Skikda, au laboratoire des travaux publics de l'Est (Antenne de Skikda) ainsi qu'au laboratoire des matériaux de construction du département de génie de civil de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda.

III.2. Programme expérimental

L'objectif de ce travail est d'étudier les modifications apportées à un béton de sable par le remplacement partiel et total avec des taux de 25, 50, 75 et 100% d'un sable ordinaire par un sable de déchet de marbre. Nous avons utilisé deux types de sables (roulés et concassés) et comparer les résultats trouvés.

Dans ce qui suit, on exposera le processus expérimental suivi, pour la mise en œuvre des mélanges témoins des différents bétons de sable et les mélanges dont le sable a été substitué par le sable de déchet de marbre avec les taux 25%, 50%, 75% et 100%.

On présentera aussi le détail des essais utilisés pour caractériser les différents bétons obtenus à l'état frais comme à l'état durci, et d'évaluer leur vulnérabilité vis-à-vis des différents milieux agressifs (acides, bases et chlorures).

Notre programme expérimental est divisé en deux campagnes:

Campagne 1: Fabriquer des bétons de sable à base d'un sable de dune de classe 0/1(formulation BSD) et le substituer par le sable de déchet de marbre de classe 0/2 avec les taux: 0%, 25%, 50%, 75% et 100%.

Campagne 2: Fabriquer des bétons de sable à base d'un sable de carrière de classe 0/3(formulation BSC) et le substituer par le sable de déchet de marbre de classe 0/2 avec les taux: 0%, 25%, 50%, 75% et 100%.

III.2.1. Etude de la composition des mélanges selon la méthode de SABLOCRETE

Nous avons essayé dans cette partie à mettre au point une formulation pour les différents types de mélanges.

Les divers bétons avaient la même nature et même dosage du ciment et les variables d'études sont: la nature et le dosage des granulats.

La méthode utilisée pour la formulation du béton de sable est la méthode SABLOCRETE (1994), et les indications de la norme NF 18-305 béton prêt à l'emploi. Dans son ouvrage; SABLOCRETE propose deux types d'approche:

- *Une approche théorique qui constitue une base de formulation de béton de sable
- *Une approche expérimentale basée sur la réalisation de plusieurs gâchées successives.

**** Approche théorique de la formulation de béton de sable**

L'approche théorique commence par l'estimation du dosage en fines qui s'inspire principalement de la formule de Caquot:

$$[\text{Fines}] = 0.38(0.063/D)^{1/5}$$

La deuxième étape consiste à estimer le dosage en eau, en fonction de la porosité minimale théorique du béton d'après Caquot [11]:

$$[\text{E}+\text{V}]_{\min} = 0.8 [d/D]^{1/5}$$

$$[\text{V}] = k[e] \quad (l/m^3)$$

d/D : l'étendue granulaire y compris les fines (borne supérieure et inférieure)

K : compris entre 2 et 2.5

L'estimation de la valeur d (borne inférieure) est délicate et ne peut se calculer que dans le cas d'un mélange totalement défloculé, elle est assimilée à une sphère et donnée par la formule suivante:

$$d = 60/f.p \quad (\text{mm})$$

avec :

f : Finesse Blaine en $[m^2/g]$

p : Masse volumique en $[g/m^3]$

Ensuite, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides:

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{Fines}] - [\text{Eau}] - [\text{V}]$$

Enfin le dosage en fines peut être estimé en terme de compacité et donc imposé vis-à-vis de la résistance.

Ces fines regroupent principalement le ciment, l'addition et la fraction du sable inférieure à $80\mu\text{m}$ souvent mineur pour les sables traditionnels. Ainsi, l'optimum de résistance serait atteint pour des dosages en ciment et en addition:

$$\text{Ciment} + \text{Addition} = [\text{Fines}]$$

Addition + Ciment = Optimum d'activité

III.2.1.1. Substitution de sable de dune par le sable de déchet de marbre

Dans le tableau III-1, on présente les différentes compositions de la campagne 1 (formulation BSD), les paramètres fixes et variables.

Tableau III-1: Différentes compositions utilisées dans l'étude de la formulation BSD

Notation	Type de béton
BSD 0%	Béton de sable à base de sable de dune.
BSD 25%	Béton de sable à base de 75% de sable de dune et 25% de sable de déchet de marbre.
BSD 50%	Béton de sable à base de 50% de sable de dune et 50% de sable de déchet de marbre.
BSD 75%	Béton de sable à base de 25% de sable de dune et 75% de sable de déchet de marbre.
BSDM	Béton de sable à base de 100% de sable de déchet de marbre.
Paramètres constants	-Dosage en ciment 400Kg/m ³ ; -E/C= 0,68; -Teneur en adjuvant; -Teneur en fines calcaire.
Paramètres variables	Taux de substitution

III.2.1.2. Substitution de sable de carrière par le sable de déchets de marbre

Dans le tableau III-2, on présente les différentes compositions de la campagne 2 (formulation BSC), les paramètres fixes et variables.

Tableau III-2: Différentes compositions utilisées dans l'étude de la formulation BSC

Notation	Type de béton
BSC (0%)	Béton de sable à base de sable de carrière.
BSC (25%)	Béton de sable à base de 75% de sable de carrière et 25% de sable de déchet de marbre.
BSC (50%)	Béton de sable à base de 50% de sable de carrière et 50% de sable de déchet de marbre.
BSC (75%)	Béton de sable à base de 25% de sable de carrière et 75% de sable de déchet de marbre.
Paramètres constants	-Dosage en ciment 400Kg/m ³ ; -E/C= 0,68; -Teneur en adjuvant; -Teneur en fines calcaire.
Paramètres variables	Taux de substitution

III.2.2. Formulation des mélanges

La formulation des bétons témoins BSD et BSC a été établie selon la méthode expérimentale du projet SABLOCRETE (1994) basée sur la détermination des volumes des différents composants, les propriétés du béton témoin, frais ou durci et les méthodes de vérification de ces propriétés sont identiques à celles du béton ordinaire. Les autres formulations sont obtenues par la substitution partielle du sable ordinaire avec les taux de 25%, 50% et 75% et 100% en remplaçant un volume de sable ordinaire avec son équivalent en sable de déchet de marbre et déterminer après, les quantités pondérales. On fixe alors le rapport E/C, le dosage en ciment et la quantité de l'adjuvant; tandis que la teneur en fines est en fonction de la nature du sable ordinaire.

Les résultats de la formulation des mélanges pour la campagne 1(formulation BSD) sont portés sur le tableau III-3.

Tableau III-3: Composition des mélanges de la campagne 1(formulation BSD)

Mélanges	Taux de substitution (%)	E /C	Adjuvant (l/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Fines calcaires (Kg/m ³)	Sable de dune (Kg/m ³)	Sable de déchets de marbre (Kg/m ³)
BSD0	0%	0,68	5,556	400	252,08	1171,246	0
BSD25	25%	0,68	5,556	400	252,08	878,434	301,287
BSD50	50%	0,68	5,556	400	252,08	585,623	602,574
BSD75	75%	0,68	5,556	400	252,08	292,811	903,861
BSDM	100%	0,68	5,556	400	172,62	0	1285,012

-Les résultats de la formulation des mélanges pour la campagne 2(formulation BSC) sont portés sur le tableau III-4.

Tableau III- 4: Composition des mélanges de la campagne 2(formulation BSC)

Mélanges	Taux de substitution (%)	E/C	Adjuvant (l/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Fines calcaires (Kg/m ³)	Sable de carrière (Kg/m ³)	Sable de déchets de marbre (Kg/m ³)
BSC0	0%	0,68	5,556	400	134,26	1294,045	0
BSC25	25%	0,68	5,556	400	134,26	970,534	329,946
BSC50	50%	0,68	5,556	400	134,26	647,022	659,894
BSC75	75%	0,68	5,556	400	134,26	323,511	989,840

Les essais effectués sur les différentes compositions sont représentés sur le tableau III-5.

Tableau III-5: Essais effectués sur les différents mélanges

Notation	Essais effectués
Formulation BSD et BSC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mesure de la masse volumique du béton frais ▪ Ouvrabilité ▪ Air occlus ▪ Résistance à la compression à 2, 7, 28 et 90jours ▪ Résistance en traction par flexion à 2, 7, 28 et 90jours ▪ Essai ultrasonique ▪ Dureté de surface ▪ Absorption par immersion ▪ Pénétration des chlorures ▪ Mesure du retrait total et endogène et perte en masse chaque jour du 1^{er} au 10^{ème} puis à 14, 21, 28, 56, 90, 120 et 150 jours. ▪ Mesure du gonflement et gain en masse chaque jour du 1^{er} au 10^{ème} puis à 14, 21, 28, 56,90, 120 et 150 jours. ▪ Attaque chimique par les acides et les bases à 1, 7, 14, 21, 28, 56, 90 et 120 jours. ▪ Pénétration des chlorures a 28, 56 et 90jours.
Nombre de mélanges	09 x 02 x 02

III.2.3. Fabrication des mélanges

a. Malaxage des bétons

Le malaxage (figure III-1) se fait dans un malaxeur à axe vertical, le volume de la cuve est de 132L et le volume de malaxage est de 100L, le malaxeur à une vitesse de rotation de la cuve à vide de 24tr/mn.

Le temps de malaxage suivant la norme NF P 18-404 est de 60 secondes pour le malaxage à sec et 120 secondes pour malaxage humide.



Figure III-1: Malaxage

b. Moules utilisés

Après le malaxage, les mélanges sont introduits dans des moules normalisés en acier permettant de réaliser les éprouvettes destinées aux essais programmés:

- Moules cylindriques de dimension ($\varnothing = 16\text{cm}$ et $H=32\text{cm}$), pour l'essai de compression;
- Moules prismatiques triples de dimension (7x7x28) cm, pour l'essai de traction par flexion, ainsi que pour l'essai de pénétration des chlorures;
- Moules prismatiques triples de dimension (7x7x28) cm, équipés de plots pour l'essai de retrait et perte en masse et l'essai de gonflement et gain en masse;
- Moules cubiques de dimension (15x15x15) cm pour l'essai de l'absorption d'eau par immersion;
- Moules cubiques de dimension (20x20x20) cm pour l'essai de la dureté de surface et la propagation du son;
- Moules cubiques de dimension (5x5x5) cm pour l'essai de l'attaque chimique par les acides et les bases.

La figure III-2 regroupe les différents moules utilisés



Figure III-2: Différents types des moules utilisés

c. Remplissage et vibration

Avant le remplissage des moules, on applique un lubrifiant sur leurs parois pour éviter toute adhérence du mélange frais, le remplissage se fait par couche suivant les dimensions des moules. La mise en place du béton dans les moules a lieu par vibration ou par piquage, en fonction de la maniabilité du béton, l'arasement se fait par une règle métallique.

d. Conservation des éprouvettes

-Avant le démoulage (figure III-3) les éprouvettes sont conservées dans un local pendant $24\pm 1\text{h}$ à une température de 20C° , humidité relative $60\%\pm 5$.



Figure III-3: Eprouvettes avant le démoulage

-Après le démoulage, plusieurs modes de conservation ont été utilisés en fonction de l'essai à faire sur les différents échantillons (tableau III-6).



Figure III-4: Conservation des éprouvettes dans l'eau



Figure III-5: Eprouvettes enveloppées de papier aluminium

Tableau III-6: Mode de conservation des éprouvettes après le démoulage

Essais	Eprouvettes	Modes de conservation
-Résistance à la compression -Auscultation -Dureté de surface	(16x32) cm (20x20x20) cm (20x20x20) cm	-Dans l'eau selon l'âge de cure voulu -28 jours dans l'eau -28 jours dans l'eau (figure III-4)
- Résistance à la traction par flexion trois points	(7x7x28) cm	-Dans l'eau jusqu'au jour de l'essai
-Absorption par immersion	(15x15x15) cm	-14 jours dans une salle humide à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et humidité relative de 90%, 28 jours à l'air libre à 20°C et humidité relative de $60 \pm 2\%$
-Retrait total et perte en masse	(7x7x28) cm avec plots	-A l'air ambiant du laboratoire pendant toute la durée des mesures (première mesure après 24h)
-Retrait endogène et perte en masse	(7x7x28) cm avec plots	-Enveloppées avec du papier aluminium (figure III-5) pendant toute la durée des mesures (première mesure après 24h)
-Gonflement et gain en masse	(7x7x28) cm avec plots	Dans l'eau pendant toute la durée des mesures (premier essai après 24h)
-Pénétration de chlorure	(7x7x28) cm	-28 jours dans l'eau, puis 28,56 et 90jours dans une solution avec 5% de NaCl
-Attaques chimiques	(5x5x5) cm	28 jours dans l'eau ensuite immergées dans les solutions suivantes pendant toute la durée des mesures (figure III-6): <ul style="list-style-type: none"> • 5% d'acide chlorhydrique (HCl), • 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4), • 5% d'acide acétique (CH_3COOH), • 5% d'hydroxyde de potassium (KOH).

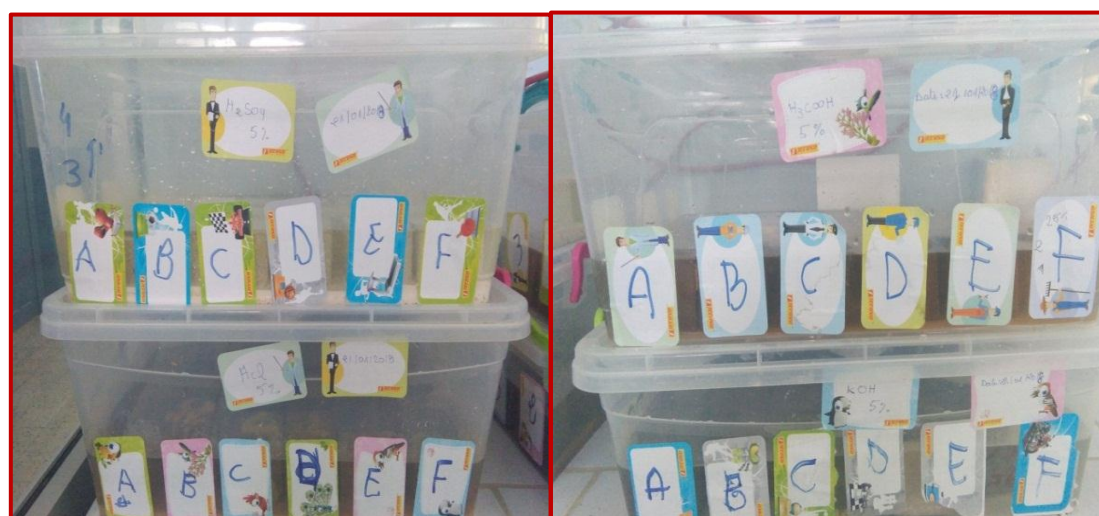


Figure III-6:Conservation des éprouvettes dans les solutions chimiques

III.2.4. Méthodes d'essais

III.2.4.1. Essais effectués sur le béton frais

A la fin du malaxage, on détermine la masse volumique, l'ouvrabilité et la teneur en air occlus.

a. Masse volumique

La masse volumique du béton frais (figure III-7) est déterminée sur les éprouvettes cubiques (15x15x15) cm³ selon la norme NF EN 12350-6.

$$\rho_{BF} = \frac{m_t - m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Avec:

ρ : La masse volumique du béton en g/cm³

m : La masse du moule vide en g

V : Le volume du moule en cm³

m_t : La masse totale du moule rempli en g



Figure III-7: Mesure de la masse volumique du béton frais

b. Ouvrabilité

L'essai d'Affaissement au cône d'Abrams (figure III-8) est l'essai le plus employé pour la mesure de la consistance du béton. Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NF P18-451. Le moule tronconique étant légèrement huilé est fixé sur la plaque d'appui, on le remplit en trois couches d'égales hauteurs, mises en place par piquage à raison de 25 coups par couche à l'aide de la tige de piquage. Après avoir arasé le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure, exprimée en cm, est réalisée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.



Figure III-8:Affaissement au cône d'Abrams

c. Air occlus

La mesure de l'air occlus a été faite à l'aide d'un aéromètre à béton (figure III-9) de huit litres selon la norme NF P18-583. Après avoir rempli la chambre inférieure de l'aéromètre de la même façon que celle pour remplir les moules. La chambre supérieure étant soigneusement fixée, on applique une pression à l'aide de la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. A ce moment, on ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres, le béton se comprime et le pourcentage de l'air occlus est directement indiqué par le manomètre intégré dans l'aéromètre.



Figure III-9: Aéromètre à béton

III.2.4.2. Essais effectués sur le béton durci

a. Essai de compression

L'essai de compression NF EN 12390-3 consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale, la mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette. Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (16x32) cm ou cubique (20x20x20) cm. On note la charge

maximale atteinte $P(N)$ et la surface de chargement $S (mm^2)$, la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors:

$$\sigma = P/S$$

Avec:

σ : Résistance à la compression en MPa.

P : Charge de rupture (N).

S : Surface d'éprouvette (mm^2).

La résistance à la compression (figure III-10) correspond à la contrainte d'écrasement d'une éprouvette à l'âge de 28 jours.



Figure III-10: Résistance à la compression

b. Essai de traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été déterminée à l'aide d'une machine de flexion 3 points de 100KN, sur des éprouvettes 7x7x28cm. Les éprouvettes sont placées dans la machine d'essais comme indiqué sur la (figure III-11). Après un bon centrage, on lance la mise en charge, au moment de la rupture, on obtient la contrainte de traction par flexion. La résistance à la traction par flexion est donnée par la formule:

$$R_t = 1,5Fl/b^3$$

Avec:

R_t : Résistance en traction par flexion en MPa

F : Charge appliquée en N

l : Distance entre les appuis (mm)

b : Coté de l'éprouvette en mm

Les éprouvettes sont testées à 2, 7, 28 et 90 jours, après une cure dans l'eau.



Figure III-11: Essai de traction par flexion trois points

c. Essai d'ultrason

Cet essai (figure III.12) est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, alors la vitesse d'impulsion peut être déterminée.

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières (mesure en transparence, mesure en surface, mesure semi directe; pour notre cas nous avons utilisé la méthode de mesure en transparence (directe) selon la norme NF EN 12504-4.

$$V = \frac{L}{T}$$

Avec:

V: La vitesse de propagation du son en km/s;

L: La longueur de parcours en mm;

T: Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en μ s.

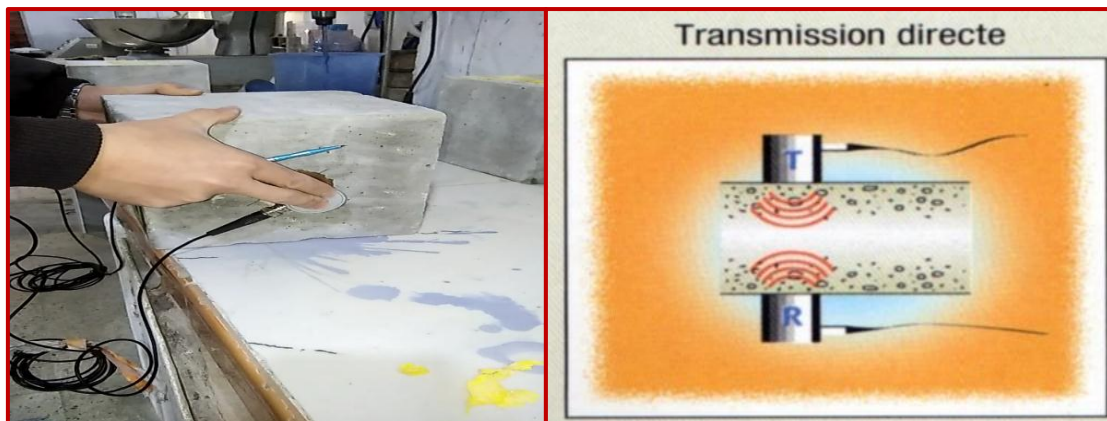


Figure III-12: Essai ultrasonique

d. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est une méthode non destructive qui permet d'estimer la résistance du béton selon la norme NF EN 12504-2. Cet essai est simple, rapide à mettre en œuvre et permet d'avoir une meilleure représentativité de la qualité de l'ensemble de l'ouvrage. Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la dureté aux chocs du béton au voisinage de la surface, après avoir disposé selon la norme les points de mesure sur la surface de l'éprouvette, on la bloque entre les deux amorces d'une presse de compression, ensuite on applique le scléromètre sur les points de mesure. La tige en acier sort du cylindre et appuie sur le béton et comprime un ressort, enfin de cours ce ressort projette une masse dans la tige, cette masse revient à la surface du béton, et entraîne de son retour un curseur permet en de lire l'indice de rebondissement.

En faisant une moyenne de ces indices et à l'aide d'un abaque de référence de l'appareil on connaît la résistance du béton. Les essais de scléromètre (figure III-13) sont effectués sur des éprouvettes cubiques (20x20x20 cm³).



Figure III-13: Essai au scléromètre

Pour la combinaison des résultats on utilise l'équation suivante:

$$R_{cc} = \frac{Is^2}{[(3,64 + 0,023Is) - (0,56xVp)]^2}$$

Avec:

R_{cc}: La résistance à la compression combinée;

Is: Indice sclérométrique;

V_p: Vitesse de propagation du son.

e. Essai de l'absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée selon la norme NBN B 15-215 comme suit:

Après le démoulage, les éprouvettes (15x15x15) cm sont conservées dans l'eau à 20± 2°C, à plus de 90% d'humidité relative jusqu'à l'âge de 14 jours. Ensuite elles sont conservées durant

28 jours à l'air avec une humidité relative de $60 \pm 2\%$ et une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse humide (M_{humide}), après la pèse de la masse humide elles sont placées dans l'étuve pendant 72 heures, la température est maintenue à $105 \pm 3^\circ\text{C}$, puis elles (figure III-14) sont pesées pour déterminer la masse sèche ($M_{\text{sèche}}$), l'absorption est donc mesurée par la formule suivante :

$$\text{Abs} = [(M_{\text{humide}} - M_{\text{sèche}}) / M_{\text{sèche}}] \times 100$$

M_{humide} : La masse humide constante de l'éprouvette après l'immersion.

$M_{\text{sèche}}$: La masse sèche constante de l'éprouvette après le séchage dans l'étuve.



Figure III-14: Essai d'absorption par immersion

f. Mesure de la perte/gain en masse

La mesure de la perte en masse est faite à l'aide d'une balance, sur les éprouvettes destinées à la mesure du retrait et du gonflement (figure III-15). On mesure la masse m_i de chaque éprouvette après 24 heures et la masse m_j des mêmes éprouvettes à l'âge de: 1, 2, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours. La perte en masse, est calculée suivant la relation:

$$\text{Perte en masse} = \frac{(m_i - m_j)}{m_i} (\text{g/Kg})$$

NB : une valeur négative indique un gain en masse



Figure III-15: Essai perte en masse

g. Essai de retrait et de gonflement

Le retrait et le gonflement (NF P18-433) sont mesurés par un Déformètre (figure III-16 et III-17) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005 mm, une tige de 270 mm de longueur doit permettre de régler le zéro du Déformètre. Cette tige est en invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut subir au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

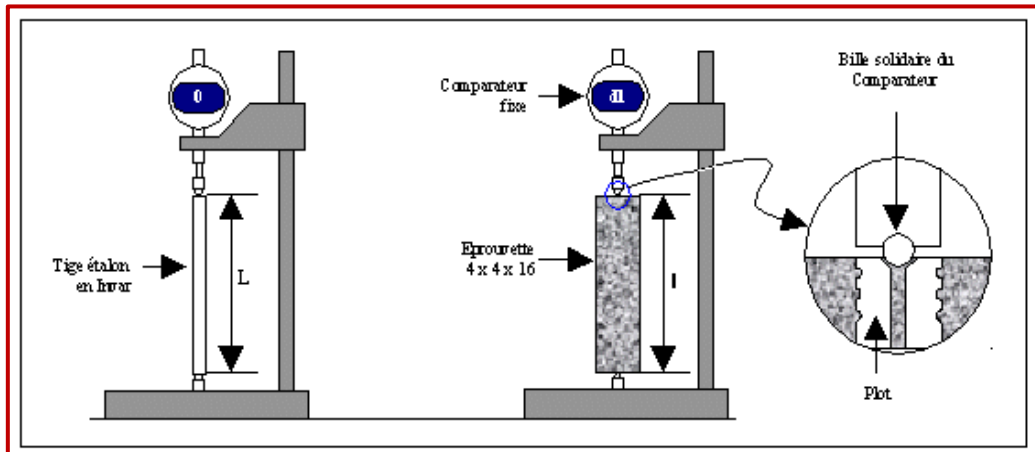


Figure III-16: Méthode de mesure du retrait et du gonflement

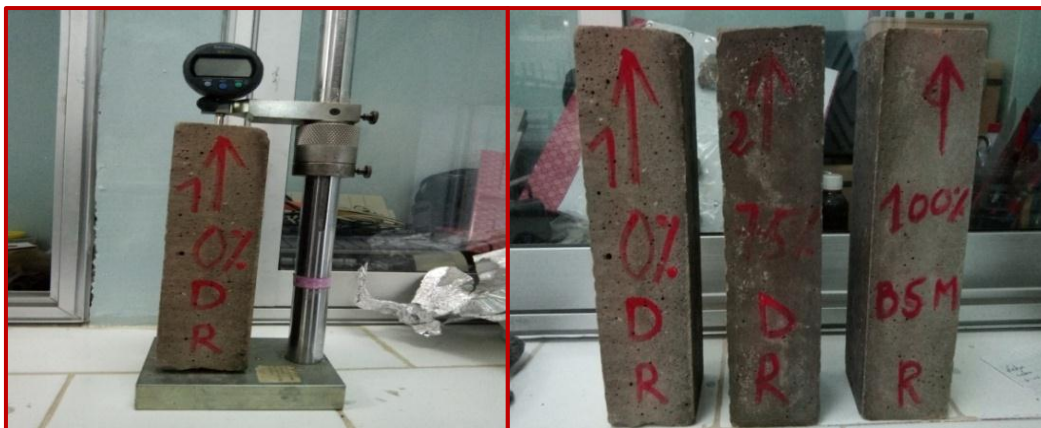


Figure III-17: Mesure de la variation dimensionnelle (retrait et gonflement)

h. Essai des attaques chimiques

Cet essai est inscrit dans la norme ASTM C267-96, après 28 jours de cure dans l'eau, les éprouvettes de dimensions $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$ sont pesées pour déterminer une masse M_1 , puis elles sont immergées dans les solutions suivantes:

- 5% d'acide chlorhydrique (HCl) acide fort ;
- 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) acide fort ;
- 5% d'acide acétique (CH_3COOH) acide faible ;
- 5% hydroxyde de sodium (KOH) solution basique ;

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons (figure III-18) immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme ASTM C267-96, les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec l'eau douce pour éliminer le béton altéré, laisser sécher pendant 30 minutes. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M_2 . Cette opération est effectuée après 1, 7, 14, 21, 28, 42, 60 et 90 jours d'immersion.

Les solutions utilisées sont renouvelées chaque 14 jours (selon la variation du pH). Enfin la résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette.

L'attaque est évaluée par la formule suivante :

$$\text{Variation de la masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 \quad (\%)$$

Avec, M_1 et M_2 les masses des éprouvettes avant et après immersion dans la solution chimique.



Figure III-18: Essai des attaques chimiques

i. Essai de pénétration des chlorures

Les chlorures sont des agents agressifs présents dans le sol, dans l'air dans des zones côtières et dans le milieu marin. Ces agents agissent sur la durabilité des bétons, s'il y a un échange.

Pour les échantillons d'essais, on a utilisé des éprouvettes prismatiques $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$, après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau à 20°C pendant 28 jours, à l'issue de laquelle elles sont immergées dans une solution de NaCl concentrée à 5%.

Après 28 jours d'immersion dans la solution NaCl (figure III-19), la résistance à la pénétration des chlorures est déterminée selon les normes UNI 7928 et JIS A 1171. La solution d'essai NaCl a été changée tous les 28 jours jusqu'à une période d'immersion de 90 jours.

A chaque essai (28, 56 et 90 jours), l'éprouvette sera coupée en deux afin d'obtenir des mini-prismes 7x7x14 cm (figure III-20). Puis on verse sur chaque section coupée une solution de nitrate d'argent AgNO_3 selon la norme UNI 7928, cette dernière réagira avec les chlorures et donne une couleur blanchâtre, qui se propage de l'extérieur de la section vers son centre. Cette propagation présente la profondeur de pénétration des chlorures, qu'on mesure à l'aide d'un pied à coulisse sur plusieurs positions (figure III-21). La profondeur de pénétration (X) est la moyenne de toutes les lectures.



Figure III-19: Conservation des éprouvettes dans la solution des chlorures de sodium NaCl

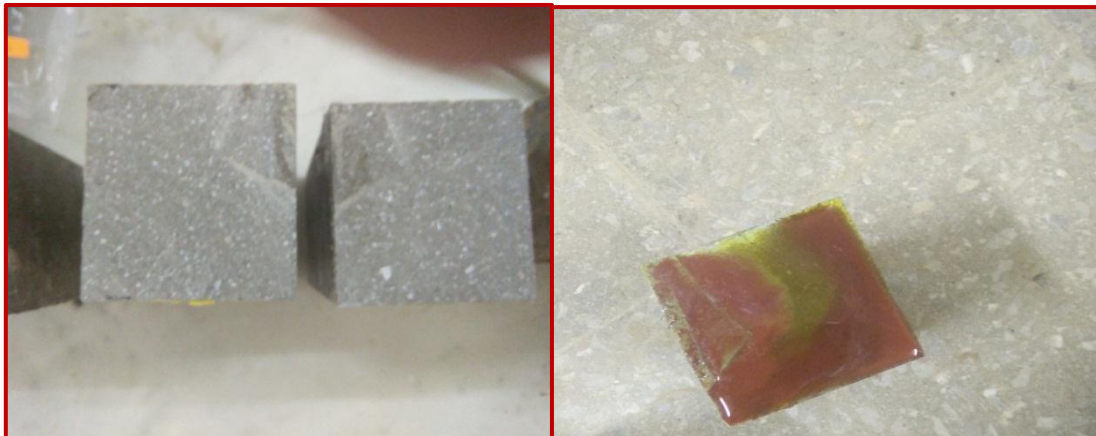


Figure III-20: Eprouvette coupée en deux et versement du AgNO_3

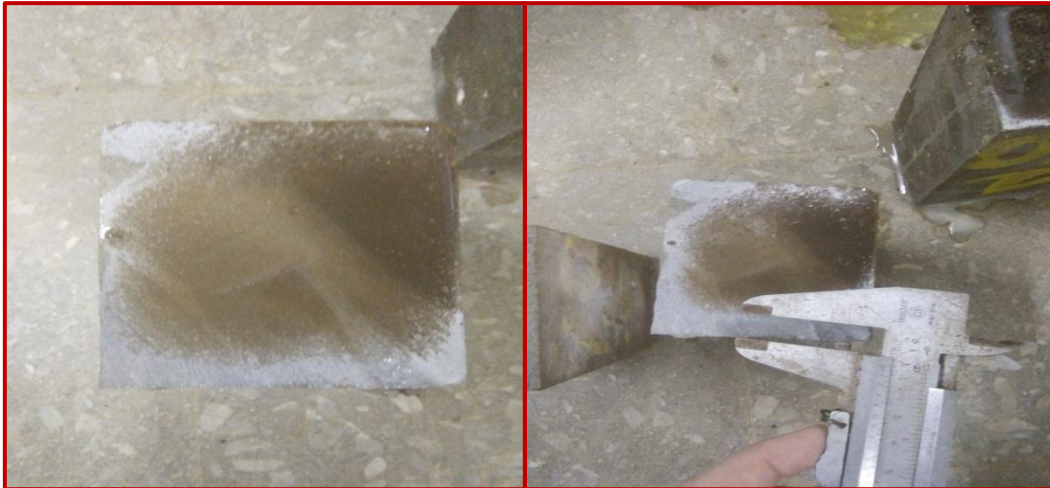


Figure III-21: Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures

III.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre:

- Le programme expérimental de l'étude.
- La formulation des différents mélanges de béton de sable, les paramètres de composition ainsi que le mode de fabrication et de conservation des éprouvettes.
- L'ensemble des essais réalisés sur les bétons de sable obtenus ainsi que les méthodes d'essais qui se résument à:
 - Essai de mesure de la masse volumique;
 - Essai de mesure de l'ouvrabilité;
 - Essai de mesure de l'air occlus;
 - Essai de rupture par flexion (traction) ;
 - Essai de rupture par compression ;
 - Essai ultrasonique ;
 - Dureté de surface au scléromètre ;
 - Essai de retrait (total, endogène) ;
 - Essai d'absorption par immersion;
 - Essai d'attaque chimique par les acides et les bases;
 - Essai d'attaque par les chlorures.

Les résultats des essais effectués et les discussions seront présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre IV

Effet du taux de substitution et le type de granulat sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable

IV. Effet du taux de substitution et le type du granulat sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats des propriétés physiques du béton frais (densité, ouvrabilité, air occlus), les propriétés mécaniques à l'état durci (résistances à la compression et à la traction, la dureté de surface, l'auscultation sonore) ainsi que la variation pondérale (perte et gain en masse) et dimensionnelle (retrait total, retrait endogène et gonflement).

On étudie alors l'effet du taux de substitution sur les performances du béton à l'état frais comme à l'état durci; et on termine par une comparaison des résultats sur les différentes formulations.

IV.2. Effet du taux de substitution sur les propriétés physiques du béton frais

IV.2.1. Ouvrabilité

La variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution est donnée par la figure IV-1.

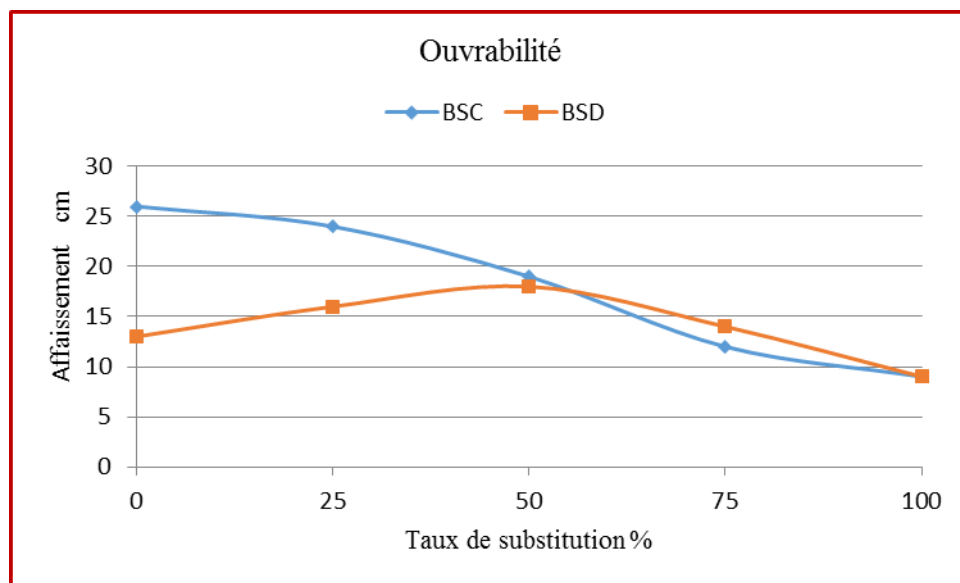


Figure IV-1: Evolution de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution

La figure IV-1 montre que pour le même rapport E/C et la même teneur en super plastifiant ainsi que la même teneur en fines calcaires; l'ouvrabilité du béton de sable de dune BSD, augmente avec l'augmentation du taux de substitution jusqu'à 50%; au-delà de cette valeur l'effet s'inverse. Par contre, l'ouvrabilité du béton de sable de carrière, diminue continuellement avec l'augmentation du taux de substitution, à 50% et 75% les deux bétons ont presque la même ouvrabilité.

Donc, on peut dire qu'au-delà de 50% du taux de substitution l'ouvrabilité des deux types de bétons diminue; ceci peut être dû à la capacité d'absorption d'eau par le sable de déchet de marbre; ce qui a été constaté par (Bicini et al., 2007); (Hebhoub et al., 2011); (Belaidi et al., 2012); (Hebhoub et al., 2014).

La diminution de l'ouvrabilité est due aussi à la forme anguleuse des grains du sable de déchet de marbre, conduisant à un frottement élevé entre ses grains (Djebien et al., 2015).

D'une manière globale, les bétons de sable de dune BSD sont moins ouvrables que les bétons de sable de carrière BSC, du fait que le sable de dune a un coefficient d'absorption d'eau élevé, et un module de finesse inférieur à 2,2. Manpreet et al., 2017 l'ont observé aussi.

IV.2.2. Air occlus

L'évolution de la teneur de l'air occlus en fonction du taux de substitution est représentée dans la figure IV-2.

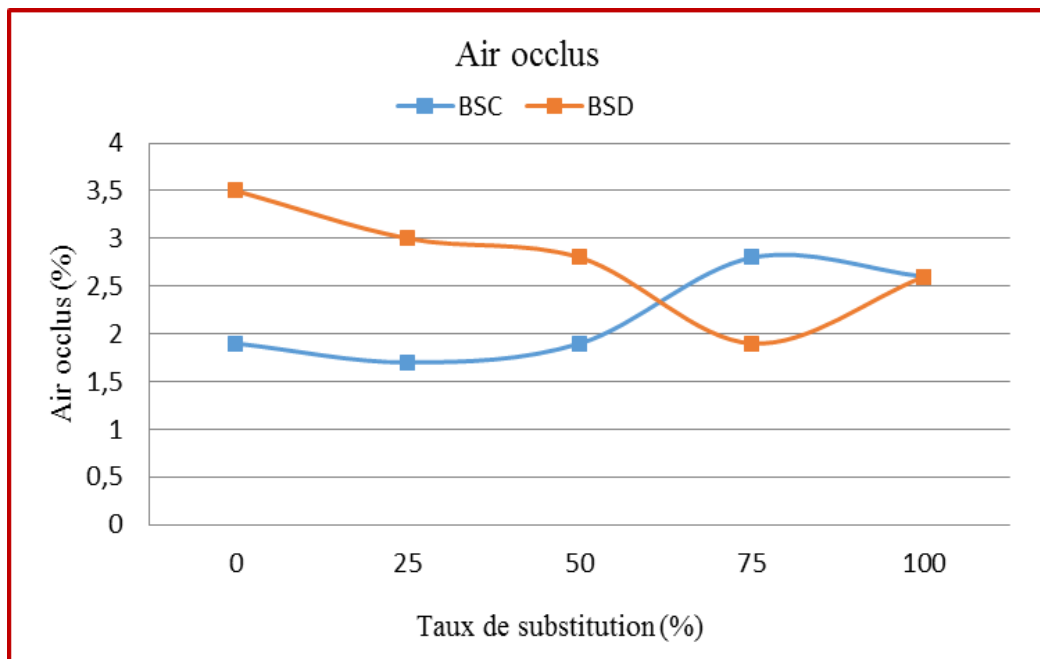


Figure IV-2: Evolution de la teneur de l'air occlus en fonction du taux de substitution

L'introduction du sable de déchet de marbre engendre une diminution de la teneur en air occlus dans le béton de sable de dune BSD (figure IV-2); cette diminution est due à la finesse du sable de déchet de marbre, ce qui conduit à une bonne compacité. Ce qui a été observé par Hebhou et al. (2011); Manpreet al. (2017).

Pour le béton de sable de carrière BSC, la teneur en air occlus augmente avec l'augmentation du taux de substitution du fait de la nature concassée du sable de déchet de marbre et du sable de carrière.

Hebhou et al. (2019) ont trouvé qu'à 15% de taux de substitution, le volume de l'air occlus est le moindre à cause de la bonne compacité engendrée par la présence de fines.

IV.2.3. Masse volumique

La figure IV-3 montre que l'introduction du sable de déchet de marbre en substituant le sable de carrière ou bien le sable de dune dans le béton de sable, a augmenté la densité des mélanges témoins.

Un optimum de densité est observé pour le BSC25%, pareil que **Hebhoub et al. (2011)** et à BSD50%. Ceux, sont les mélanges les plus compacts.

À 100% de taux de substitution, la densité obtenue est supérieure à celles obtenues pour les bétons témoins BSD0% et BSC0%, du fait que le sable de déchet de marbre a la plus grande masse volumique (**Hebhoub et al., 2014**).

Hebhoub et al. (2020), dans un mortier, il a été trouvé que l'optimum est obtenu à 15% de taux de substitution en raison de la rétention d'eau par le déchet de marbre.

Si on compare les taux d'air occlus avec les densités, on trouve que cette variation est logique.

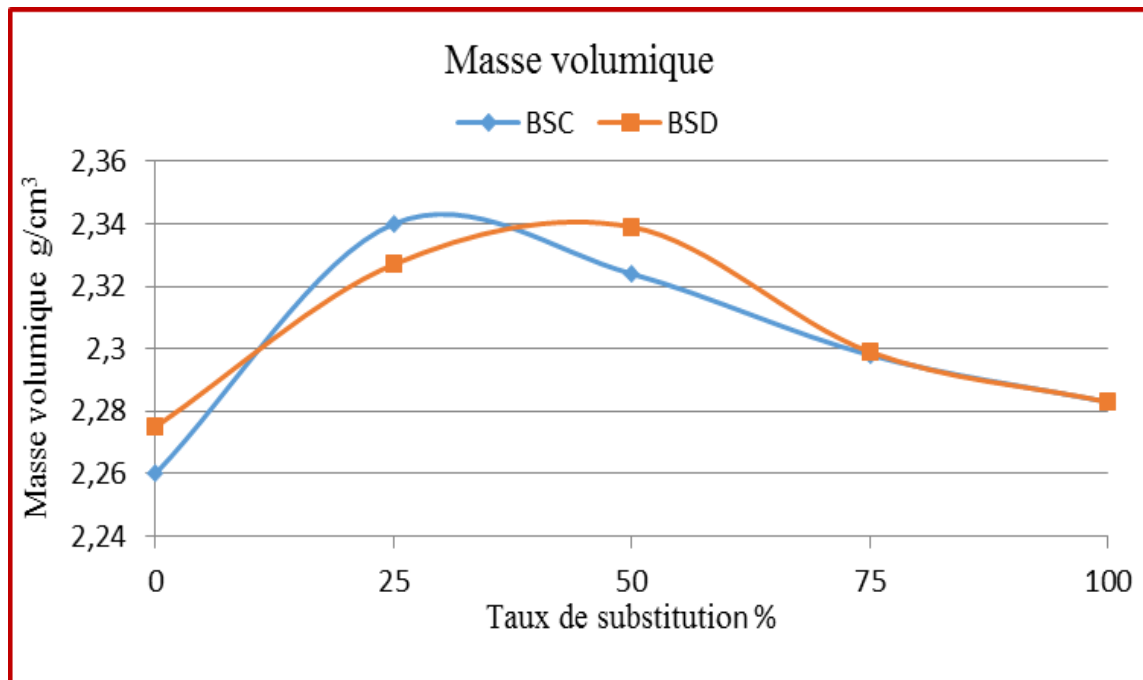


Figure IV-3: Evolution de la densité en fonction du taux de substitution

IV.3. Effet du taux de substitution sur les propriétés physiques du béton durci

IV.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été déterminée à l'aide d'une presse à béton selon la norme NFEN12390-3, les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV-4.

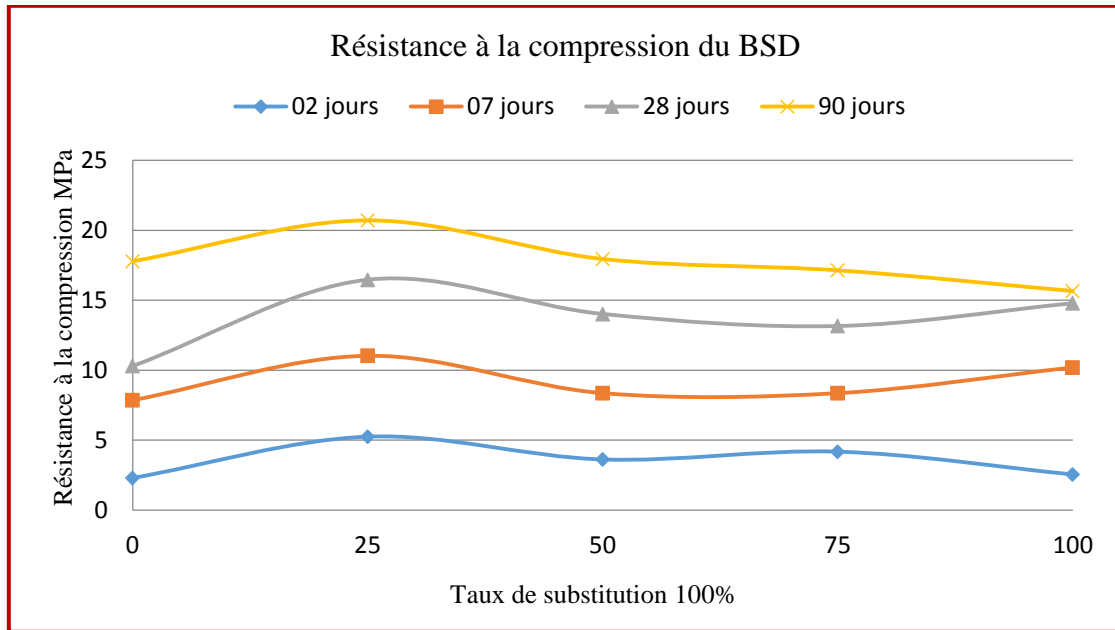


Figure IV-4 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de dune

La figure IV-4 montre que La résistance à la compression du béton de sable de dune BSD s'accroît seulement pour le taux de 25%, avant de diminuer en augmentant le taux de substitution; la même tendance de variation est observée pour tous les âges de cure, donc cette dernière a été affectée par la présence de déchet de marbre comme substituant partiel à 25%.

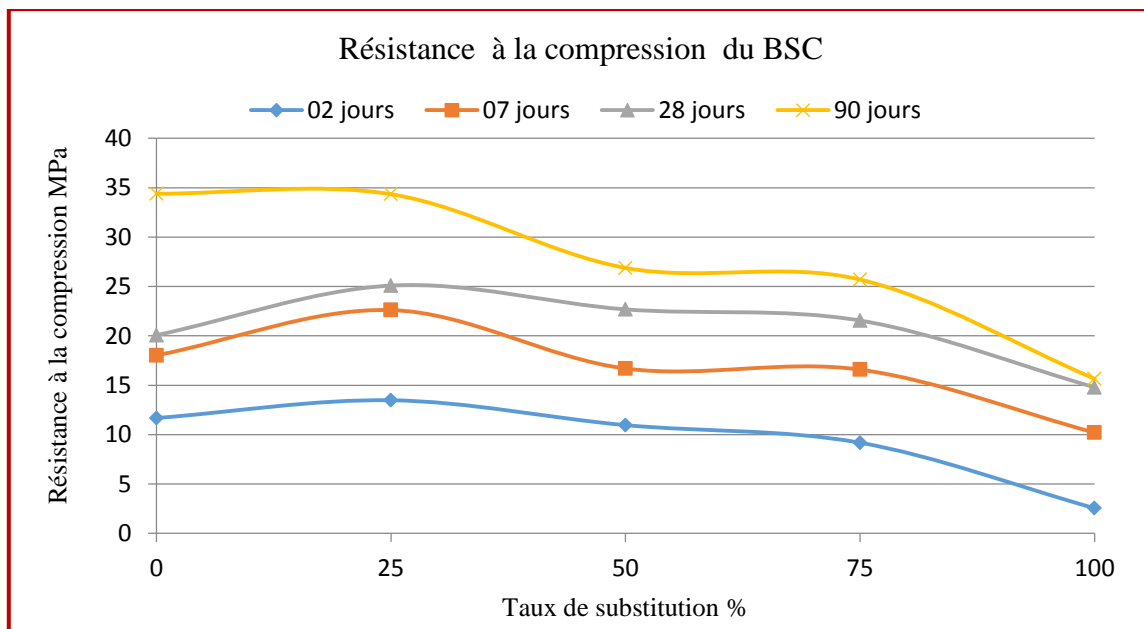


Figure IV-5: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de carrière

L'évolution de la résistance à la compression portée sur la figure IV-5, du béton de sable de carrière BSC présente la même tendance que celle du BSD mais, les BSC ont atteint une

résistance très proche d'un béton ordinaire ayant déjà une valeur de 22MPa à 7jours et 25MPa après 28jours de cure, et cela pour une substitution partielle de 25%, ceci a été observé par **Hebhoub et al. (2011)**. **Ali Abdo et al. (2014)** ont trouvé un optimum de résistance à 15% de substitution de sable.

Le béton de sable de déchet de marbre BSDM a donné une résistance à la compression supérieure à celle du mélange témoin BSD 0%, mais elle reste inférieure à celle obtenue avec le BSC0%, du fait de la forme concassée du sable de carrière et du sable de déchet de marbre qui donne plus de cohésion par rapport à un sable roulé.

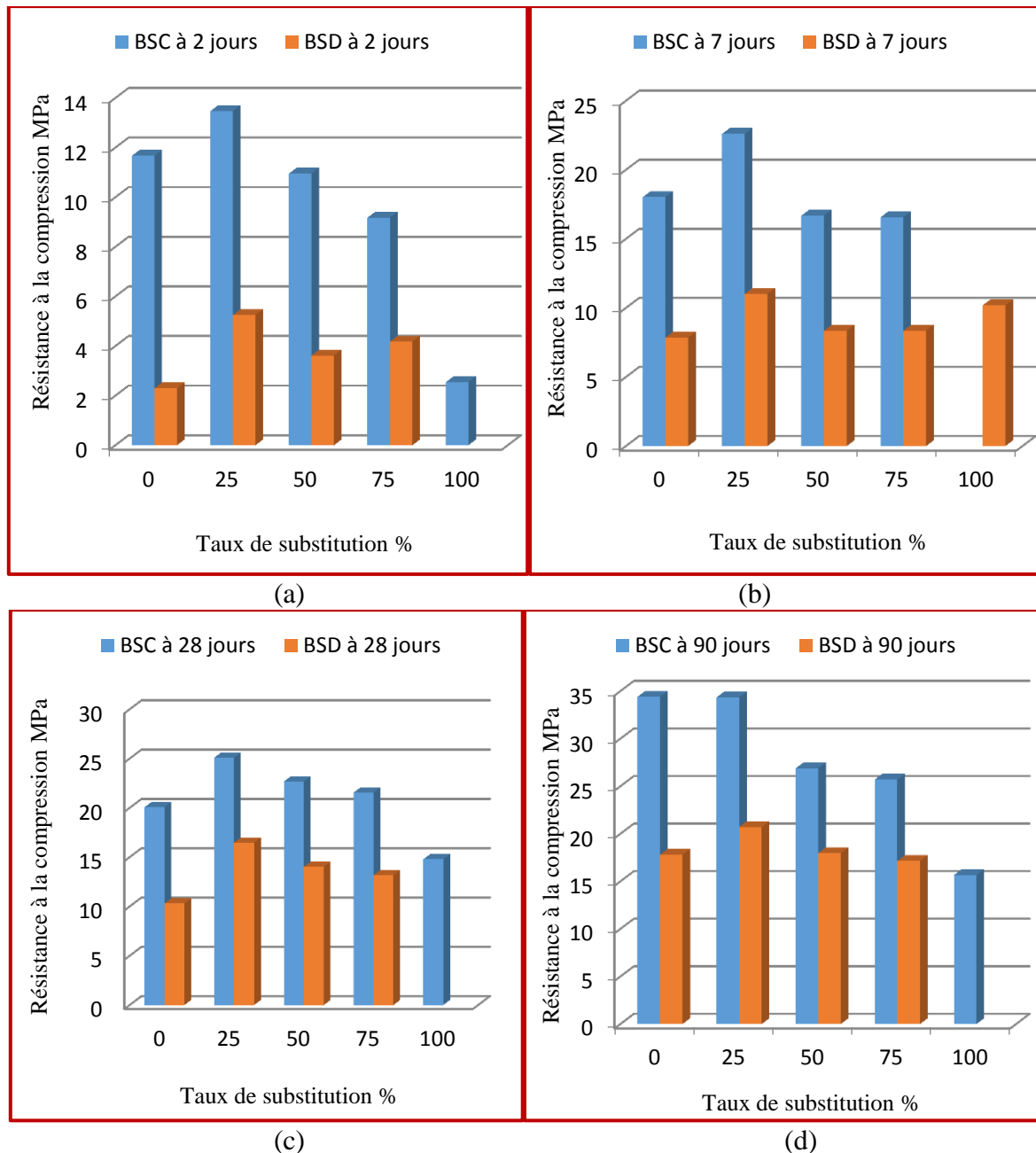


Figure IV-6: Comparaisons de la résistance à la compression du béton de sable de dune et du béton de sable de carrière selon les taux de substitution (a) à 02 jours; (b) à 07jours; (c) à 28jours; (d) à 90jours.

Il est clair que les résistances obtenues pour le béton de sable de carrière (figure IV-6), sont bien meilleures que celles obtenues pour le béton de sable de dune; **Ceylan et al. (2013)** ont trouvé que la résistance à la compression obtenue avec un granulat de carrière est meilleure que celle obtenue avec 100% de sable de déchet de marbre.

Depuis le jeune âge, 25% de substitution a donné les meilleures résistances soit avec le sable de carrière ou bien avec le sable de dune, à jeune âge le béton de sable de déchet de marbre a donné une résistance inférieure à celle obtenue pour les autres mélanges exceptant le BSD témoin, contrairement à **Hebhoub et al. (2011)**; cette tendance va changer à partir de sept jours de cure et jusqu'à 90 jours.

Le développement de la résistance à la compression peut être dû au SiO_2 actif qui réagit avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former les hydrates secondaires des silicates de calcium pour être chimiquement stable et plus dense côté structure (**Omar et al., 2020**).

La présence de carbonates de calcium favorise la création d'un site de nucléation engendrant la formation du calcium carbo-aluminates (**Hebhoub et al., 2020**).

IV.3.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction a été déterminée avec l'essai de traction par flexion trois points, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV-2 (voir annexe) et représentés par la figure IV-7.

Pour la résistance à la traction; les plus élevées ont été obtenues par le mélange BSC témoin et BSC25%. La résistance à la traction a chuté avec les taux de substitution de 50%, 75% et 100%. On peut dire que la substitution n'a pas amélioré la résistance à la traction de nos mélanges; **Ali abdo et al. (2014)** ont trouvé un optimum autour de 10% de substitution.

Omar et al. (2012) ont trouvé que la résistance à la traction par flexion a augmenté d'environ 8% lors de l'utilisation de 50% du déchet de calcaire et 15% de la poudre de marbre avec différentes teneurs en ciment.

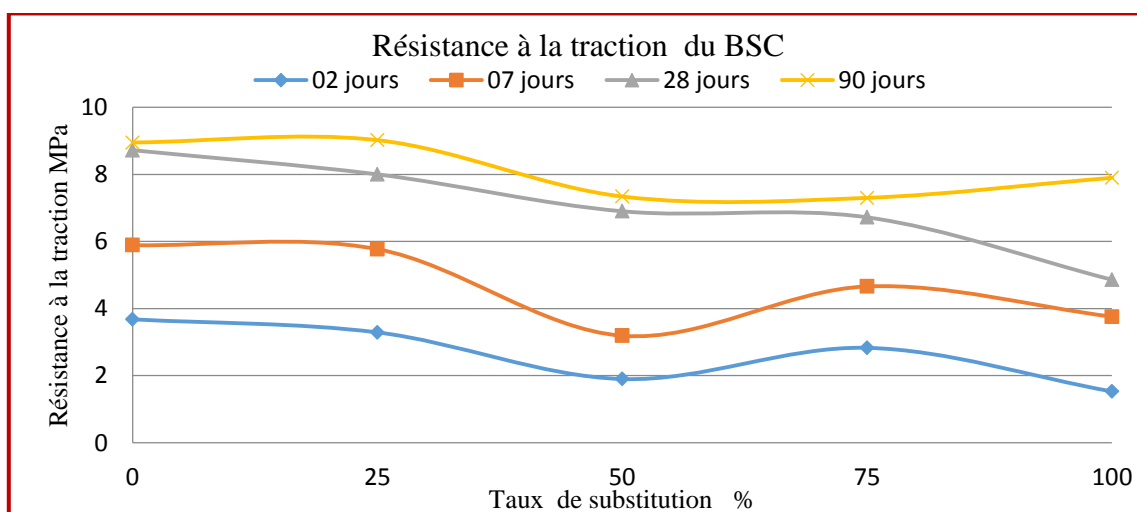


Figure IV-7: Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de carrière

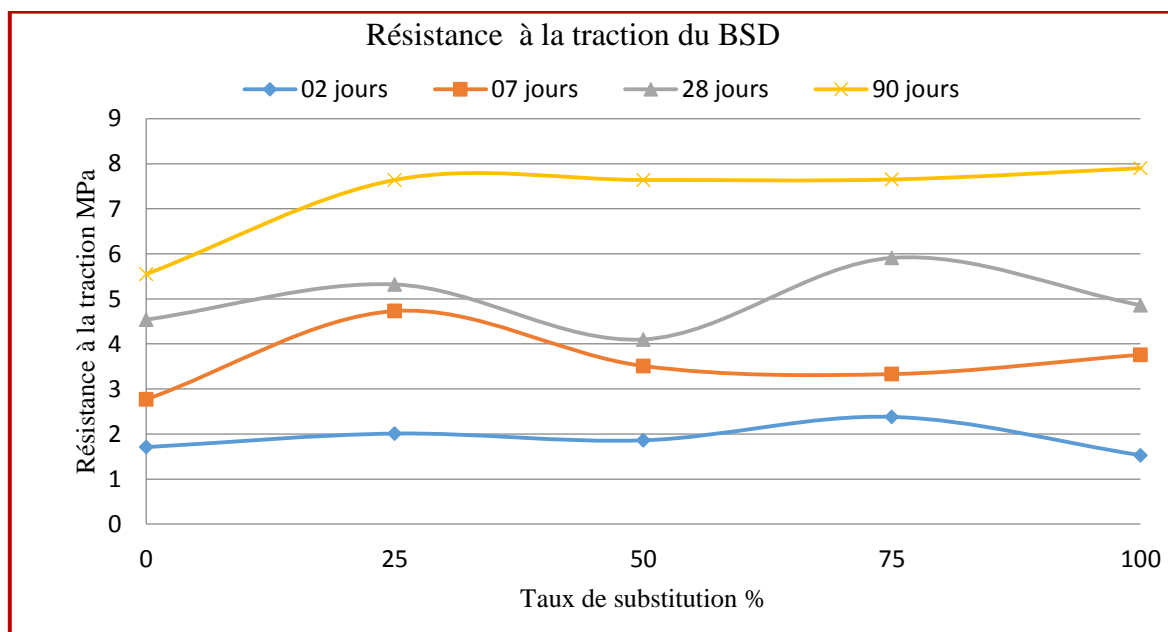


Figure IV-8: Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge et du taux de substitution dans le béton de sable de dune.

A jeune âge (02jours) (figure IV-9 (a)); le béton de sable de carrière BSC a atteint une résistance à la traction assez élevée, comparant au béton de sable de dune BSD, du fait de la bonne cohésion du sable de carrière à cause de sa nature concassée et la teneur en CaO. Avec 25% de substitution dans le BSC, la résistance à la traction a baissé, tandis qu'elle a enregistré une petite augmentation quant au BSD, à 50% de substitution on observe une égalité des deux bétons, pour rehausser à 75%. Le béton de sable de déchet de marbre enregistre une résistance égale à celle obtenue avec BSD0%.

A l'âge de 7jours(figure IV-9 (b)), on observe la même tendance que pour 02jours, mais ici le béton de déchet de marbre a dépassé le BSD0% (témoin); à moyen âge de 28jours (figure IV-9 (c)); la résistance à la traction diminue avec l'augmentation du taux de substitution pour le BSC, tandis qu'à 75% dans le BSD la résistance augmente du fait de la prédominance du déchet de marbre qui a amélioré la cohésion du sable de dune.

Après 90jours de cure (figure IV-9(d)), on voit clairement que la résistance à la traction a dépassé 7MPa pour tous les taux de substitution soit dans le sable de carrière ou bien le sable de dune, sauf pour le BSD0% dont la résistance est restée inférieure à 6MPa, on peut dire que le déchet de marbre a amélioré la résistance à la traction surtout avec l'utilisation du sable de dune; grâce à la bonne cohésion et la présence de carbonates, ce qui a été observé par **Hebhoub et al. (2011)**.

Hebhoub et al. (2020) expliquent que la substitution de sable par un déchet de marbre, dans un mortier a amélioré la résistance à la traction à cause de deux facteurs:

Ces mortiers contiennent une certaine quantité de fines, ce qui favorise l'empilement granulaire lors du malaxage et provoque ainsi l'augmentation de la contrainte.

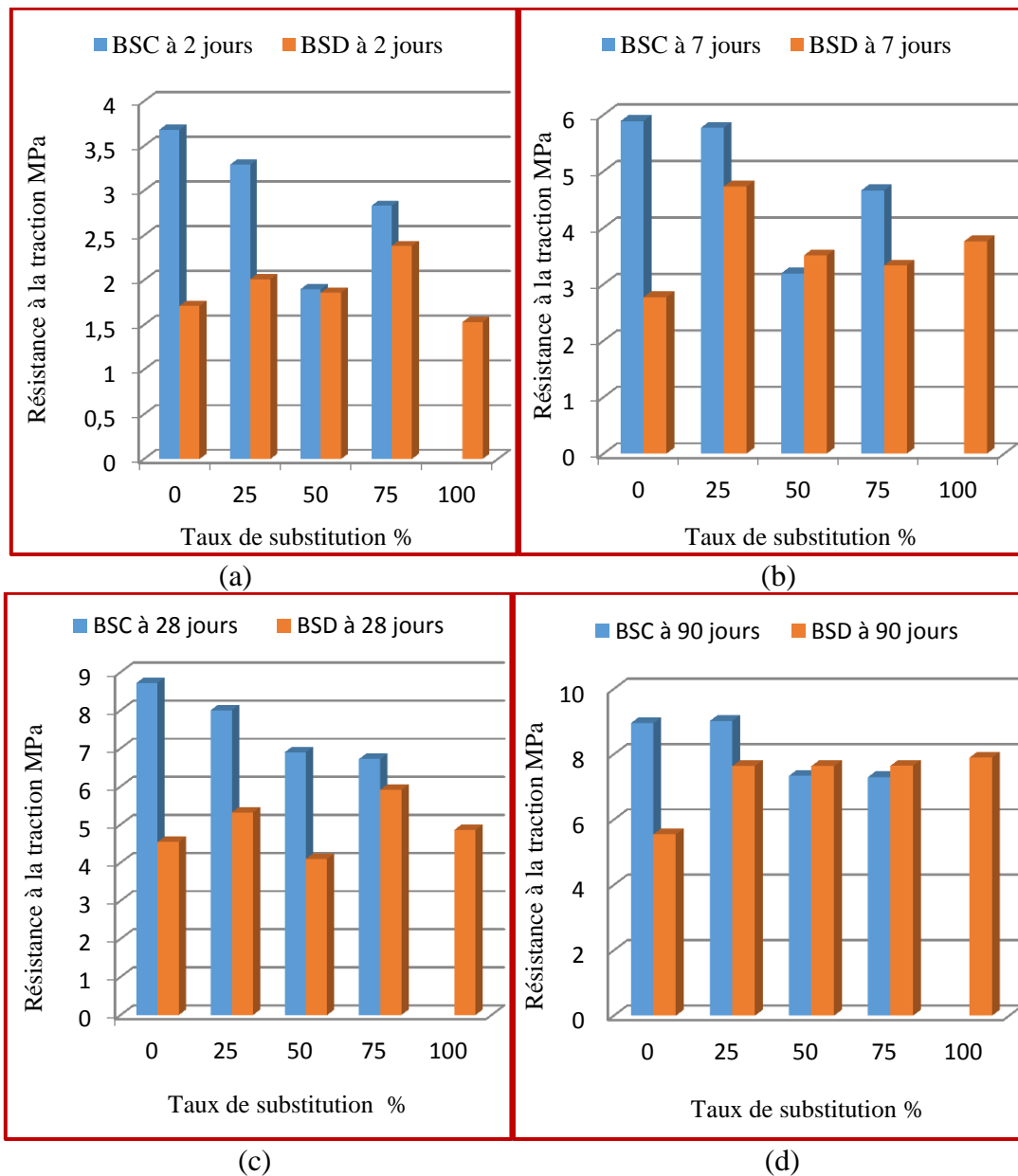


Figure IV-9: Comparaisons de la résistance à la traction du béton de sable de dune et du béton de sable de carrière en fonction de l'âge et des taux de substitution: (a) à 02jours (b) à 07jours (c) à 28jours (d) à 90jours

Le sable de déchet de marbre est caractérisé par ses grains anguleux et poreux ce qui favorise le collage pate/granulats.

IV.3.3. Vitesse de propagation de son (essai ultrasonique)

La vitesse de son a été mesurée avec l'appareil de l'auscultation dynamique, les essais ont été fait sur des éprouvettes cubiques 20x20x20 cm à l'âge de 28jours; les résultats sont regroupés sur le tableau IV-3 (voir annexe) et représentés par la figure IV-10.

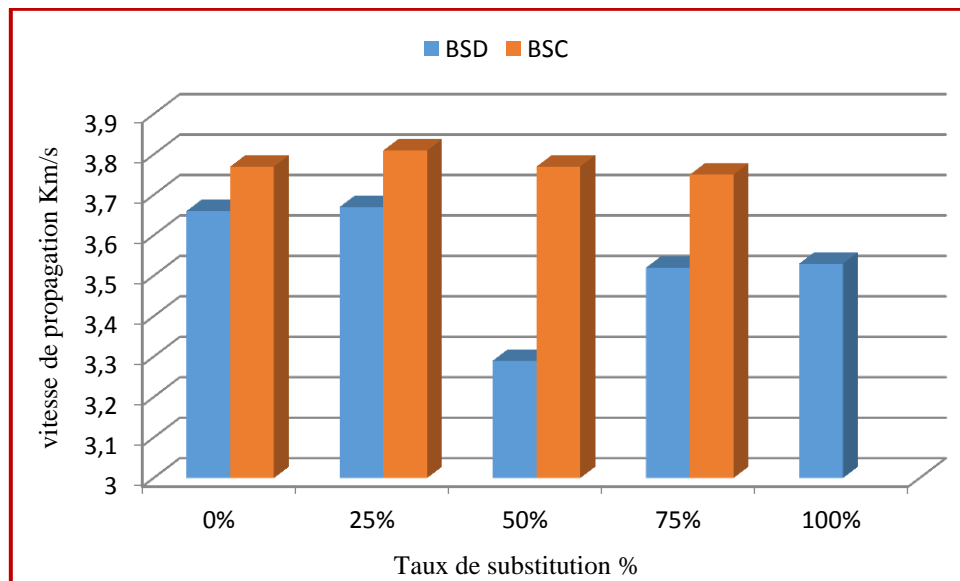


Figure IV-10: La vitesse de propagation du son en fonction du taux de substitution

La figure IV-10 montre que la vitesse de propagation du son à travers le béton de sable de dune BSD est plus rapide avec les taux de substitution de 0% et 25% de substitution, le minimum de vitesse est obtenu avec la substitution de 50%, après elle augmente avec 75% de substitution.

Le remplacement du sable ordinaire par 25% de sable de déchet de marbre a légèrement augmenté la densité du mélange à base de sable de carrière BSC, elle est justifiée par le passage rapide du son (figure IV-10). On rappelle que ce même mélange a donné le maximum de résistance à la compression avec l'essai destructif. Tandis que dans le mélange BSD la propagation du son était lente avec le mélange remplacé par 50% de sable de déchet de marbre, donc ce mélange est le moins dense. Car le sable de déchet de marbre a engendré une porosité au sable de dune, ce mélange est le moins résistant.

Les vitesses allant du 3,200km/s au 3,7km/s présentent des résistances moyennes, ce qui est le cas du béton de sable de dune BSD et le béton de sable de déchet de marbre BSM; alors que les vitesses allant du 3,700km/s au 4,2km/s présentent des résistances hautes, c'est le cas du béton de sable de carrière BSC. **Ali abdo et al. (2014)**, **Manpreet et al. (2017)** ont trouvé que la poudre de déchet de marbre n'avait pas d'effet significatif sur la valeur de la vitesse de propagation du son; la légère variation est due au fait que cette dernière est proportionnelle à la racine carrée de la résistance à la compression. À l'opposé de **Demirel et al. (2020)** qui affirme que la vitesse de propagation de son est améliorée avec l'augmentation du taux de substitution.

IV.3.4. La résistance à la compression déterminée avec la méthode combinée en fonction de l'indice de rebondissement et la vitesse du son

On présente sur les figures IV-11 et IV-12 la variation de l'indice sclérométrique et la résistance en compression en fonction du taux de substitution et l'indice de rebondissement.

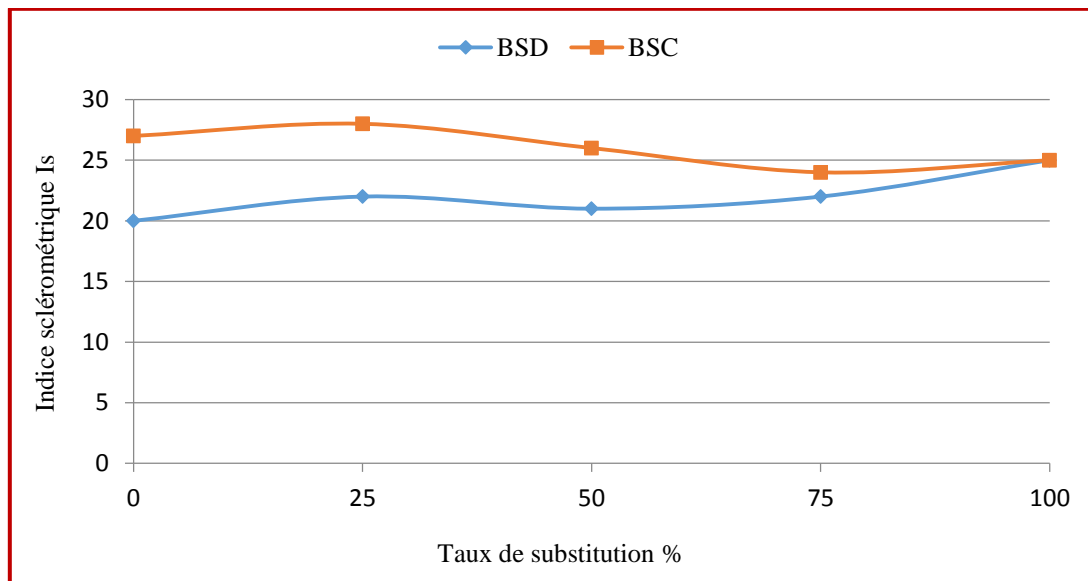


Figure IV-11: Indice sclérométrique en fonction du taux de substitution

L'indice sclérométrique augmente légèrement avec 25% de taux de substitution pour redescendre avec les autres taux de substitutions, et ce pour le béton de sable à base de sable de carrière, par contre le mélange à base de sable de dune, après son augmentation à 25%, on observe une légère diminution à 50% te remonter, après avec le taux de 75% de substitution. La substitution totale à 100% a donné une valeur de l'indice sclérométrique inférieure à celle du béton témoin BSC0%, mais elle est meilleure que celle obtenue pour le BSD0%.

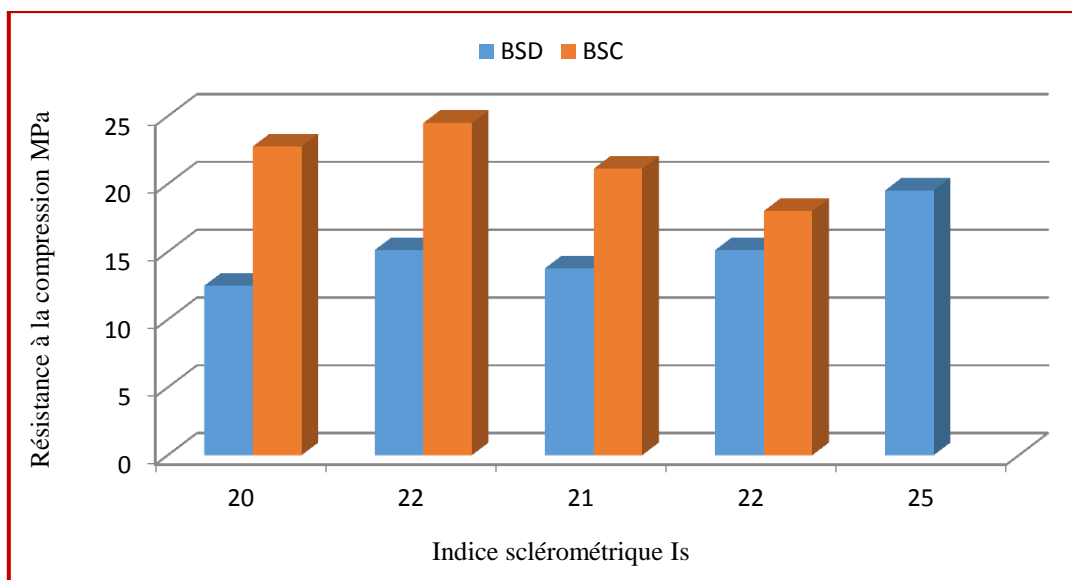


Figure IV-12: La résistance à la compression correspondante à l'indice de rebondissement des deux bétons de sable

Les valeurs de l'indice sclérométrique (figure IV-12) données par le béton de sable de carrière BSC sont meilleures que celles obtenues par le béton de sable de dune BSD et le béton de sable de déchet de marbre BSM, ce qui donne les meilleures résistances. Ces résultats confirment encore une fois que ce mélange est le plus résistant (figure IV-6).

La résistance à la compression obtenue avec la formule combinée entre l'ultrasonique et l'indice de rebondissement est représentée dans la figure IV-13.

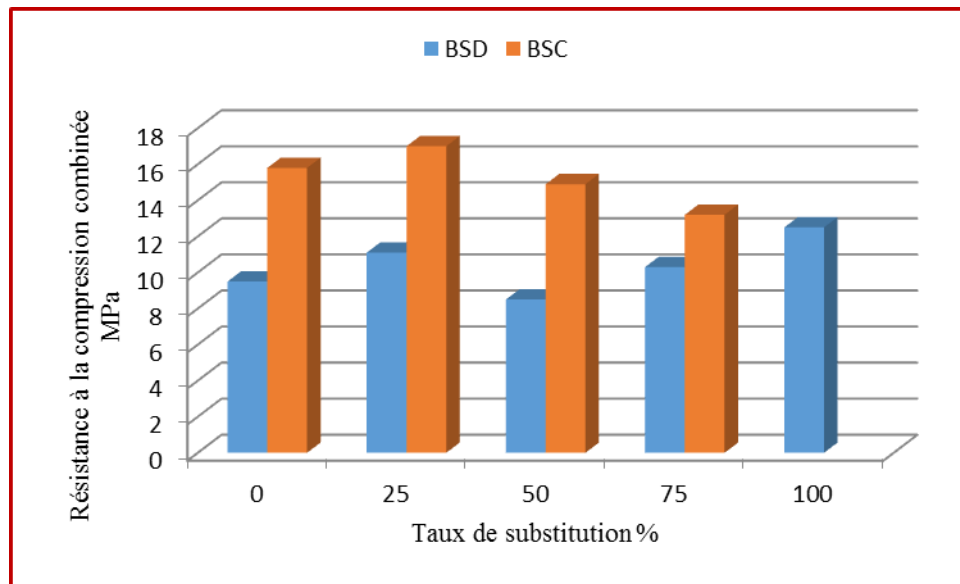


Figure IV-13: La résistance à la compression selon la formule combinée

La tendance de l'évolution de la résistance à la compression calculée par la méthode combinée (figure IV-13) est similaire à celle observée pour les essais destructifs (figure IV-6); la meilleure résistance est toujours obtenue autour de 25% de taux de substitution dans le béton de sable de carrière.

IV.4. Variations pondérales et dimensionnelles

IV.4.1. Retrait total et perte en masse

L'introduction de sable de déchet de marbre dans la formulation du béton de sable, a un considérable impact, sur le retrait des éprouvettes conservées dans le laboratoire avec une humidité relative de 80%.

Le retrait total est influencé par:

- L'humidité relative et la température ambiantes, il augmente avec la diminution de l'humidité et l'augmentation de la température;
- Il est plus grand d'autant plus que l'hydratation du ciment est accentuée, les ciments finement broyés présentent un retrait plus grand;
- La composition minéralogique du ciment influe, et surtout les aluminates tricalciques;
- Il dépend aussi des adjonctions minérales pulvérulentes ainsi que la fraction fine des granulats.

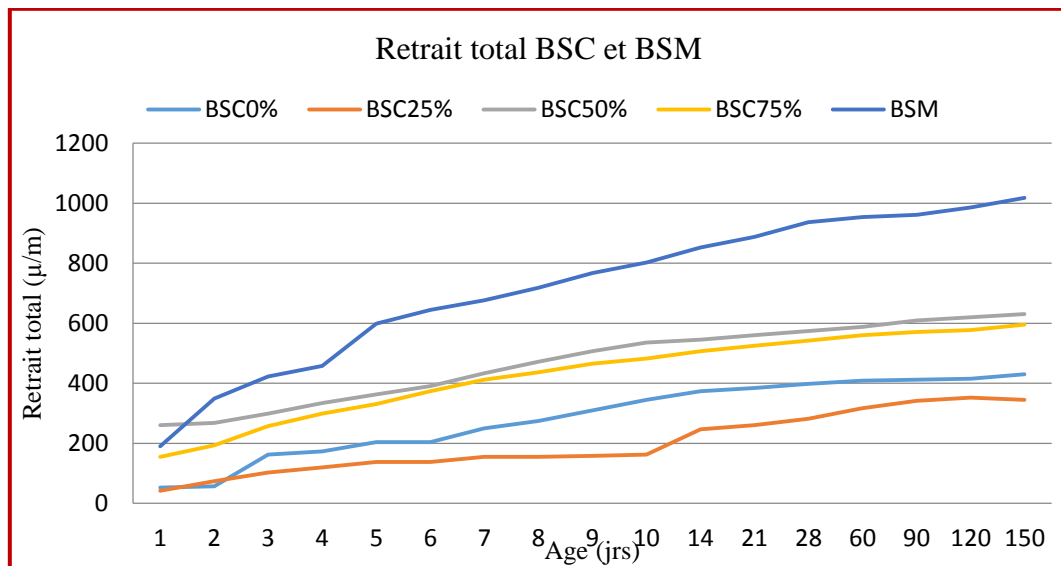


Figure IV-14: Effet du taux de substitution sur le retrait total du BSC et BSM en fonction de l'âge

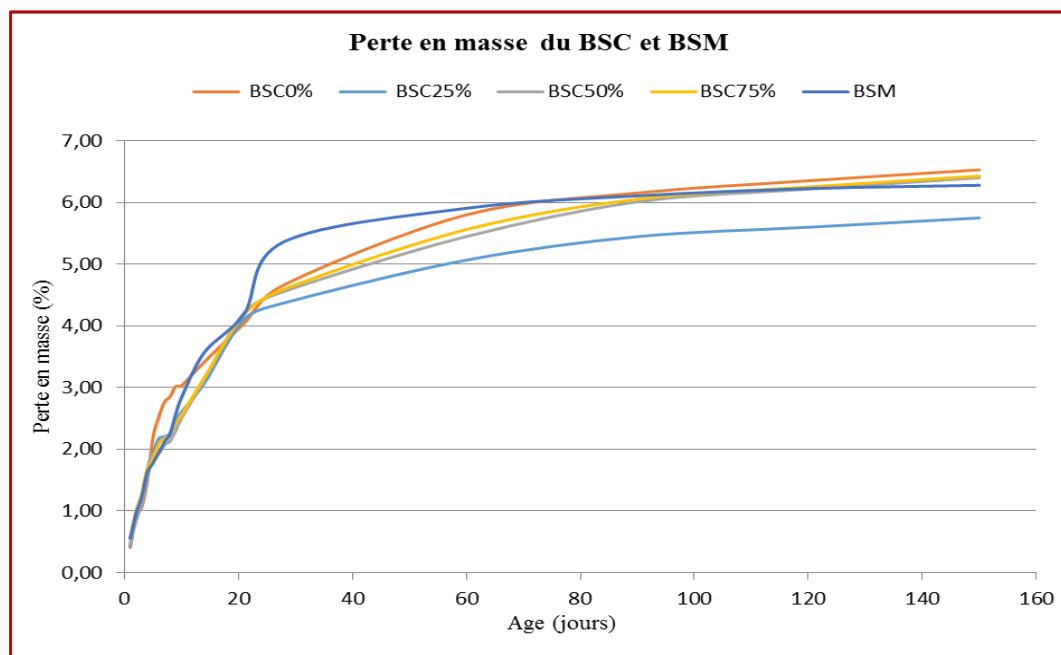


Figure IV-15: Effet du taux de substitution sur la perte en masse du BSC et BSM en fonction de l'âge

On voit que le retrait (figure IV-14) devient de plus en plus important avec l'augmentation du taux de substitution, le maximum de retrait est obtenu avec le béton de sable de déchet de marbre (BSM); le minimum de retrait est obtenu avec le béton témoin et celui avec 25% de substitution, donc on peut dire que la substitution totale a augmenté le retrait du béton de sable. Ce qui a été observé par **Hebhoub et al. (2020)**.

Vis-à-vis du temps, les valeurs du retrait augmentent plus rapidement durant la période allant du premier jour jusqu'à 14 jours.

Sur la figure IV-15, on voit presque la même cinétique du développement de la perte en masse des éprouvettes conservées à l'air, du béton à base de sable de carrière, la plus grande perte en masse (figure IV-15) est donnée par le BSM, ce qui est conforme avec le résultat du retrait total, le minimum de perte est obtenu avec le béton de sable de carrière avec 25% du taux de substitution.

Durant 28 jours de séchage à l'air ambiant (laboratoire), la perte en masse est très rapide du fait de l'évaporation d'eau contenue dans les échantillons. Après cette période la perte en masse tend à se stabiliser.

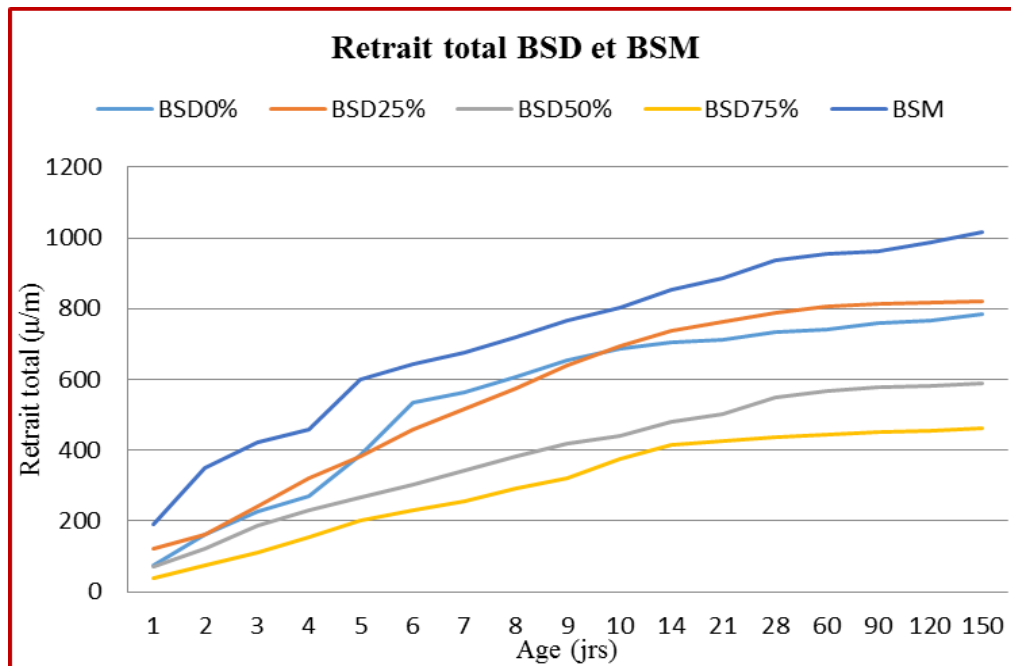


Figure IV-16: Effet du taux de substitution sur le retrait total du BSD et BSM en fonction de l'âge

La figure IV-16 montre que les valeurs du retrait total des bétons de sable de dune ont presque la même évolution, le BSM marque le maximum de retrait. Contrairement à **Hebhoub et al. (2020)** qui trouvent que le maximum est à 20% de taux de substitution dans un mortier et expliquent que l'évaporation d'eau contenue dans les éprouvettes est à l'origine de leurs résultats.

On voit que le retrait total, augmente avec l'âge de conservation pour tous les taux de substitution, le minimum est alors obtenu avec le taux de 75%.

Sardinha et al. (2016) trouvent que le retrait le plus prononcé était durant les premiers jours et tend à être stable après, et que le retrait total est indifférent à la réduction de la teneur en ciment par son remplacement avec la poudre de marbre.

Le retrait total évolue très rapidement pour tous les types d'éprouvettes conservées à l'air libre, à cause de leurs tailles, qui rend la dessiccation plus favorable (**Bouhamou, 2014**)

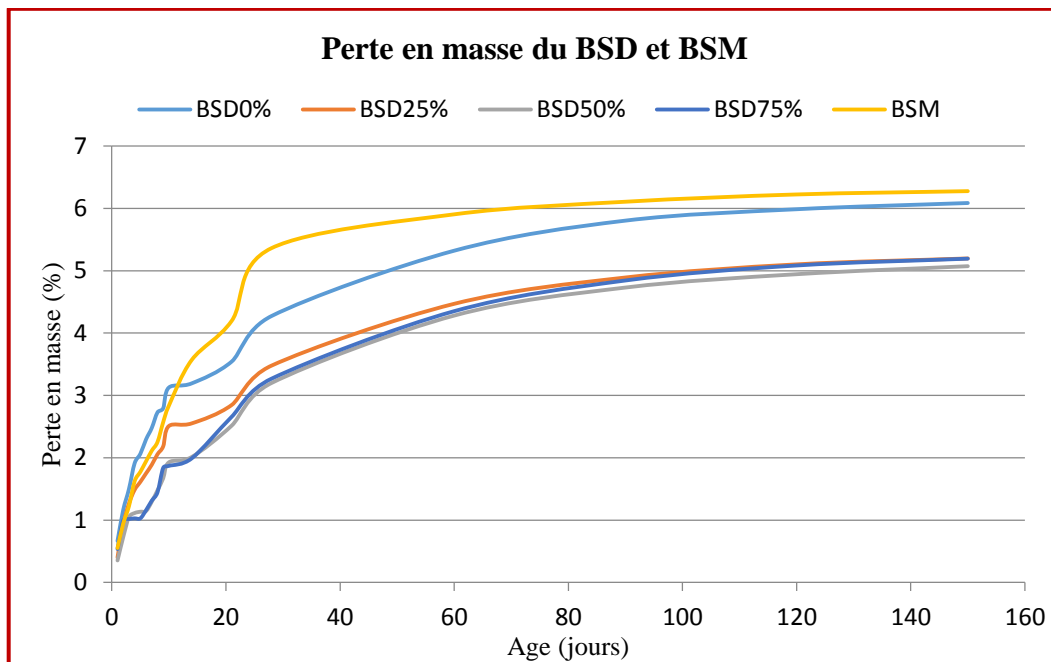


Figure IV-17: Effet du taux de substitution sur la perte en masse du BSD et BSM en fonction de l'âge

Quant à elle, la perte en masse (figure IV-17) est presque identique pour tous les mélanges, durant les premiers 28 jours, le béton de sable à base de 100% de sable de déchet de marbre, a donné le maximum de perte, cela peut être dû à la porosité engendrée par l'ajout de marbre.

Le béton témoin BSD0% a donné une valeur proche de celle obtenue avec la substitution totale.

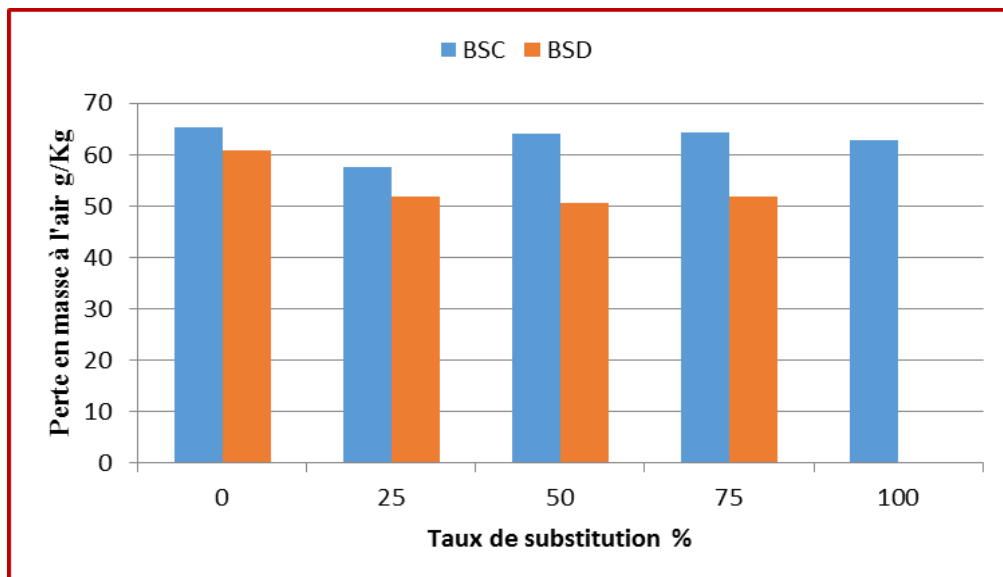


Figure IV-18: Comparaison de la perte en masse à l'air en fonction du taux de substitution entre le BSC et BSD

Globalement le béton de sable à base de sable de dune a marqué moins de perte en masse à l'air par rapport à celui avec le sable de carrière (figure IV-18), ça peut être dû à la capacité

d'absorption d'eau du sable de carrière, donc l'évaporation de cette eau engendre une perte en masse importante.

IV.4.2. Retrait endogène et perte en masse

Ce retrait est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'hydratation du ciment non encore hydraté, phénomène connu comme l'auto dessiccation, il résulte du fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau + ciment), ce processus entraîne une diminution de volume après la prise du béton (Chalarem, 2016).

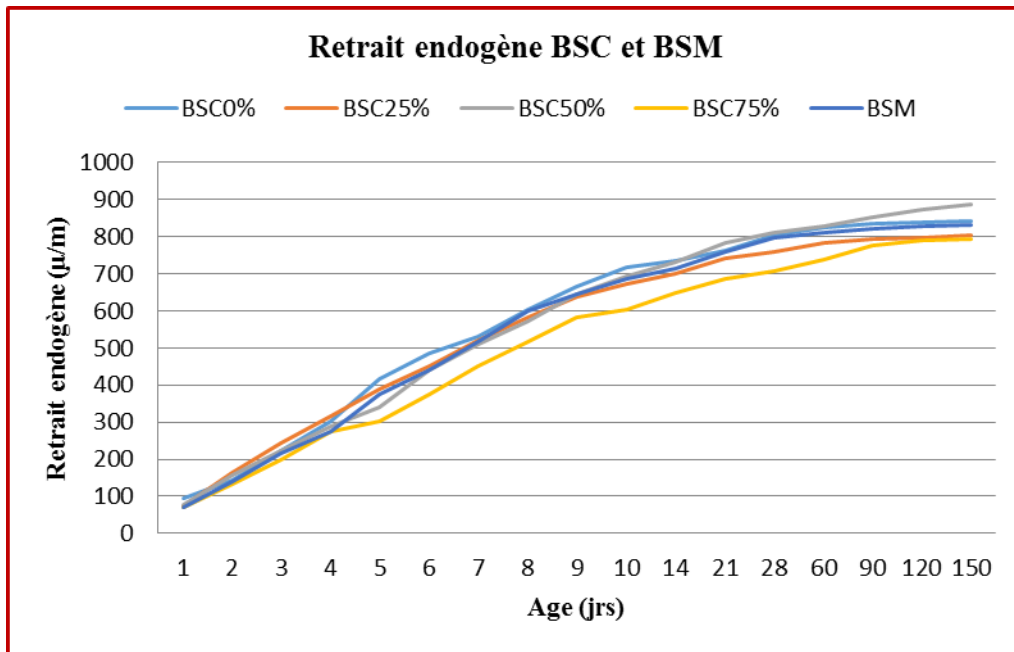


Figure IV-19: Effet du taux de substitution sur le retrait endogène du BSC et BSM en fonction de l'âge

Les valeurs du retrait endogène (figure IV-19) du béton de sable à base de sable de carrière semblent très rapprochées pour tous les mélanges, mais on distingue quand même un minimum de retrait obtenu par 75% de substitution. Le retrait a augmenté continuellement le long de 28 jours, et commence à se stabiliser jusqu'à 150 jours (fin de l'essai).

On peut dire ici que le taux de substitution n'avait pas d'effet significatif sur le retrait endogène du béton de sable de carrière.

Les additions minérales et les adjuvants contenus dans la pâte du béton de sable, ont surtout un effet sur la cinétique de la contraction Le Chatelier ce qui est notre cas puisque nous avons utilisé un superplastifiant comme adjuvant.

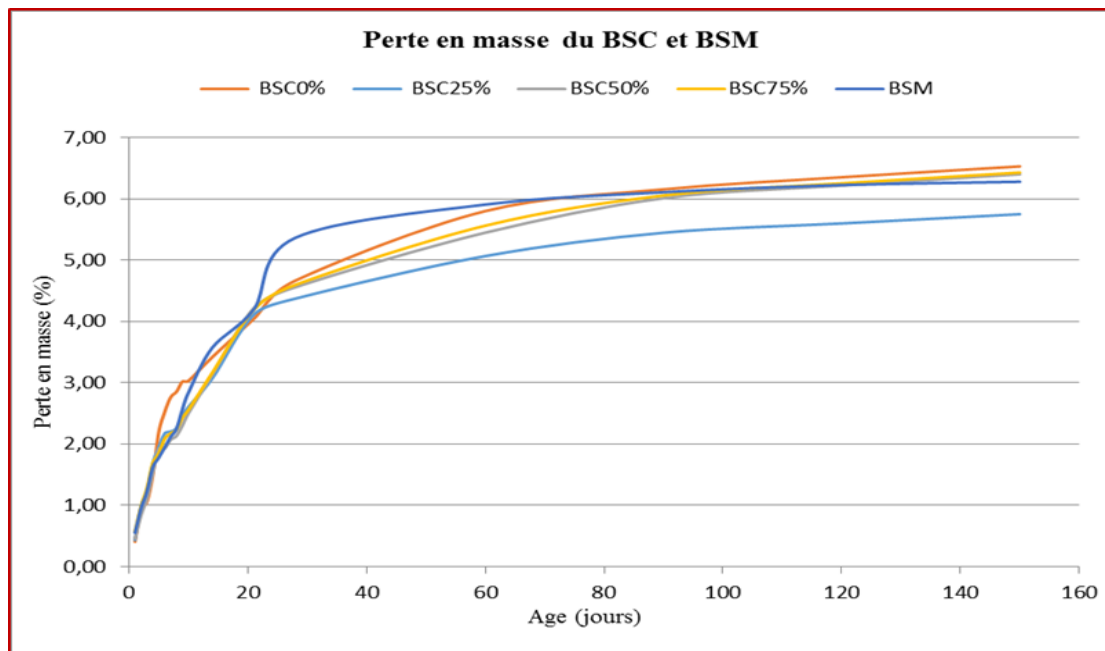


Figure IV-20: Effet du taux de substitution sur la perte en masse du BSC et BSM en fonction de l'âge

On constate sur la figure IV-20 que les valeurs de perte en masse durant les quatre premiers jours sont très rapprochées pour tous les mélanges, à partir de cet âge, on voit que les valeurs du retrait deviennent un peu plus importantes pour le BSC25% et BSC50% par rapport à celles du BSC75% et BSM et cela jusqu'à 28 jours, au-delà de cet âge, la perte en masse des bétons BSC75% et du BSM deviennent les plus importantes.

Pour le béton de sable de dune, la plus grande perte en masse (figure IV-21) est donnée par le béton témoin, durant toute la période de conservation dans du papier aluminium, tandis que le minimum est donnée par le BSM, c à d à 100% de substitution. Au-delà de 28 jours on remarque que le BSM dépasse le BSD 50%.

La perte en masse a augmenté continuellement durant toute la période de conservation, donc on peut dire que la substitution de sable de dune par le sable de déchet de marbre a diminué la perte en masse endogène du matériau, cela peut être dû à la capacité d'absorption du marbre.

Pour le béton de sable de dune, l'évolution du retrait endogène (figure IV-21), a la même allure pour tous les mélanges, il a augmenté en continu le long de 28 jours pour commencer à se stabiliser après, et jusqu'à la fin de l'essai. Le minimum de retrait endogène est observé pour le béton de sable de dune substitué par 75% de sable de déchet de marbre.

Il est admis que le retrait endogène est une conséquence des changements d'HR dans les pores en fonction de la structure des pores et de l'eau disponible; différents mécanismes sont déclenchés.

Manuel et al. (2016) ont trouvé que le retrait total est indifférent à la réduction de la teneur en ciment par sa substitution par la poudre de marbre.

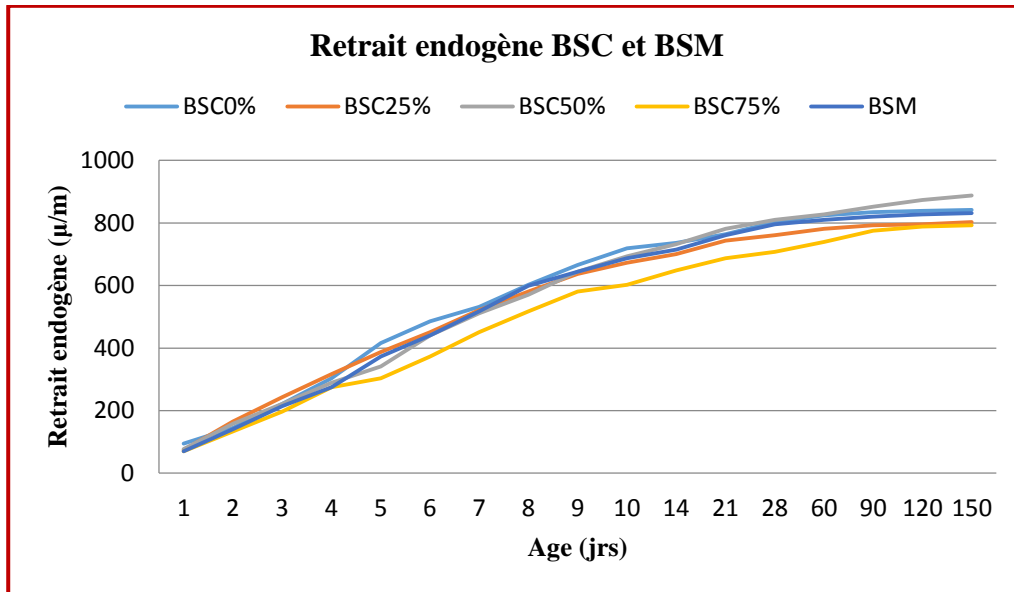


Figure IV-21: Effet du taux de substitution sur le retrait endogène du BSD et BSM en fonction de l'âge

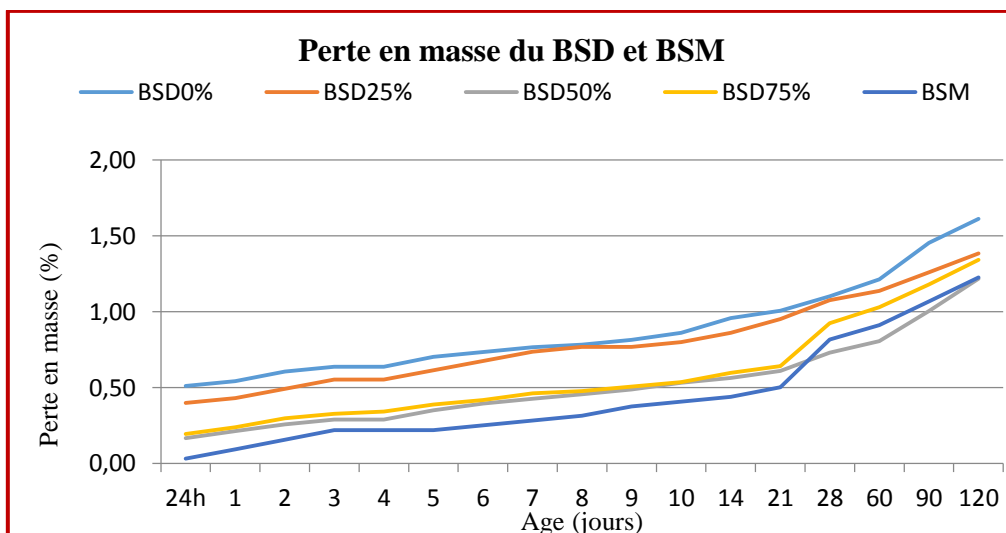


Figure IV-22: Effet du taux de substitution sur la perte en masse endogène du BSD et BSM en fonction de l'âge

La figure IV-22 présente l'évolution de la perte en masse endogène en fonction du taux de substitution et en fonction de l'âge, le minimum de perte, est obtenue par la substitution totale du sable de dune par le sable de déchet de marbre du fait de la porosité engendrée par ce dernier.

La substitution partielle (25%, 50% et 75%) avait un effet inverse sur la perte en masse, le maximum est obtenu par le béton de sable témoin (BSD0%).

Une comparaison de la perte en masse endogène en fonction du taux de substitution entre le BSC, BSD et BSM est donnée par la figure IV-23.

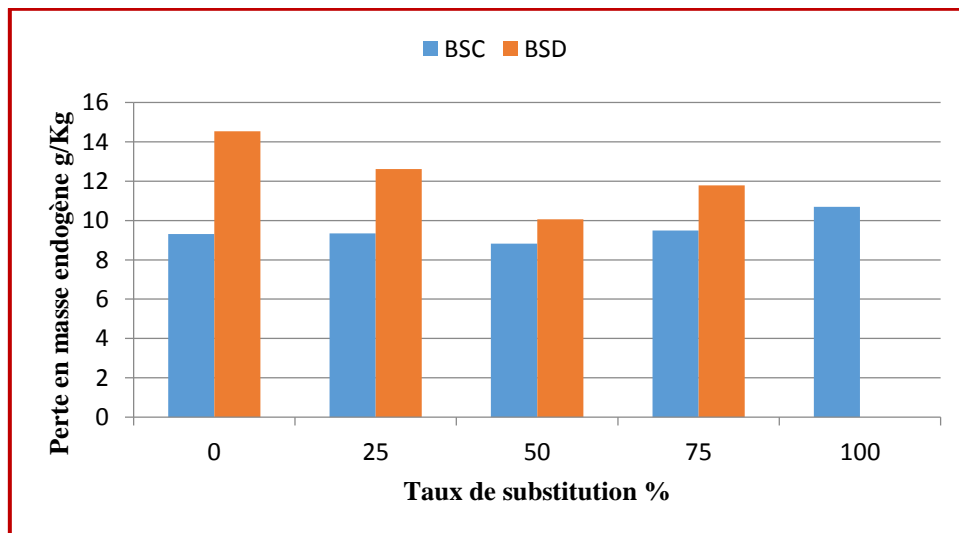


Figure IV-23: Comparaison de la perte en masse endogène en fonction du taux de substitution entre le BSC, BSD et BSM

Contrairement à ce qui a été observé dans la figure IV-18, le béton de sable de dune a perdu plus de masse endogène que le béton de sable de carrière.

IV.4.4. Gonflement et gain en masse

Dans la figure IV-24, on présente l'effet du taux de substitution sur le gonflement du BSC et BSM en fonction de l'âge.

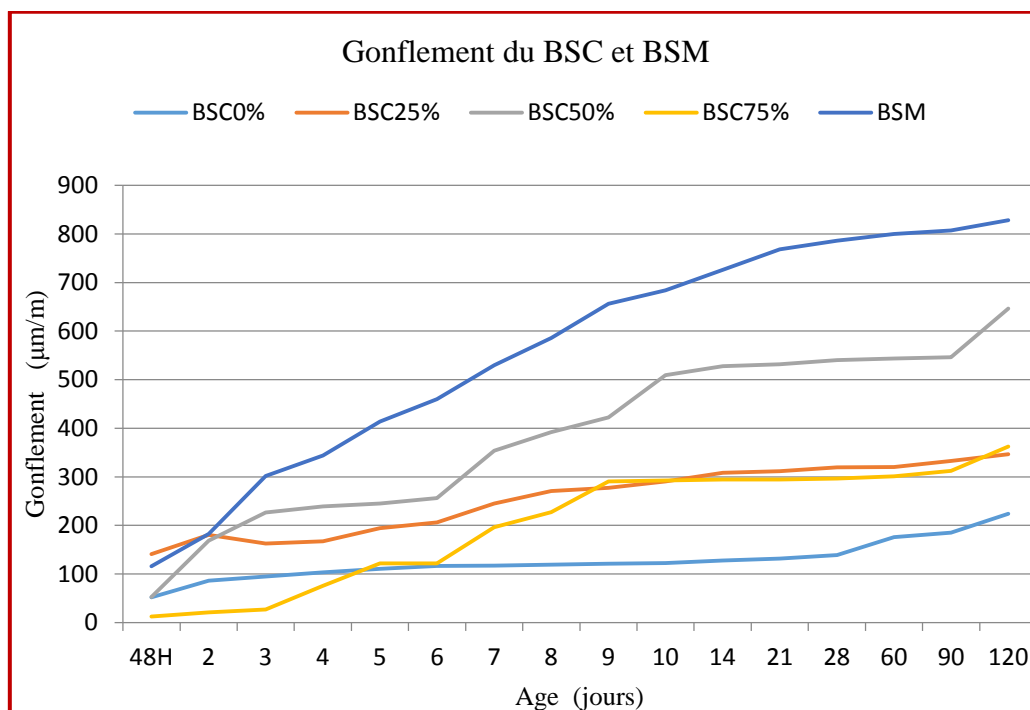


Figure IV-24: Effet du taux de substitution sur le gonflement du BSC et BSM en fonction de l'âge

On peut dire que la substitution a augmenté le gonflement, le minimum est obtenu par le béton témoin BSC0%, et le maximum est donné par le BSM, on peut expliquer ce résultat par le fait de la capacité d'absorption du sable de déchet de marbre, l'essai de l'absorption par immersion du BSC a donné la même évolution.

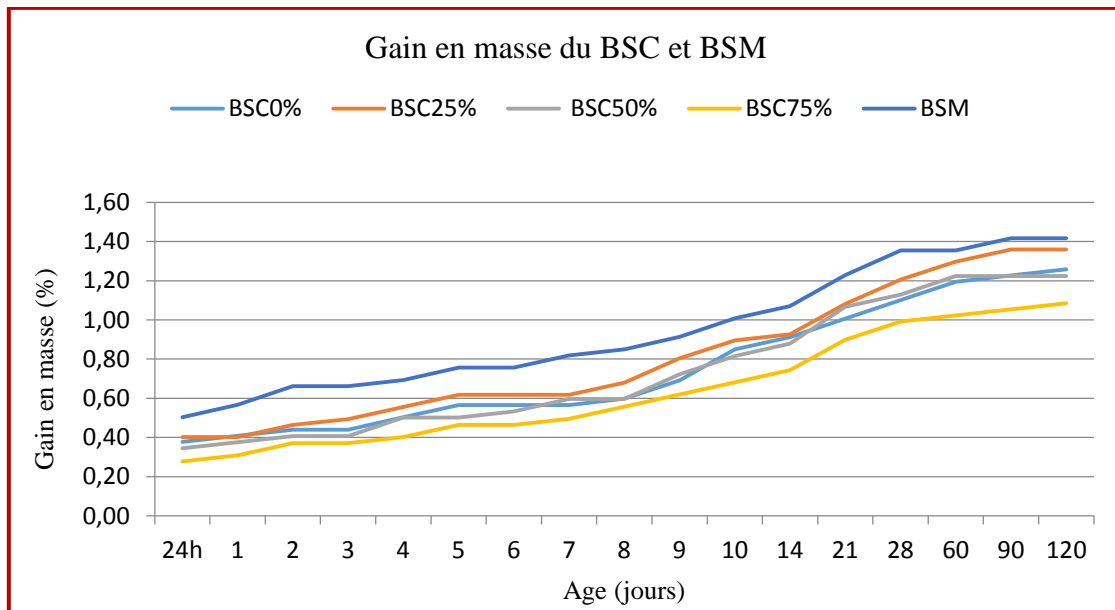


Figure IV-25: Effet du taux de substitution sur le gain en masse du BSC et BSM en fonction de l'âge

La figure IV-25 montre qu'un maximum de gain en masse est donné par le BSM, vient après le BSC25%, c'est dû à la capacité d'absorption du sable de déchet de marbre et celle du sable de dune en même temps; le minimum de gain est obtenu avec BSC75%.

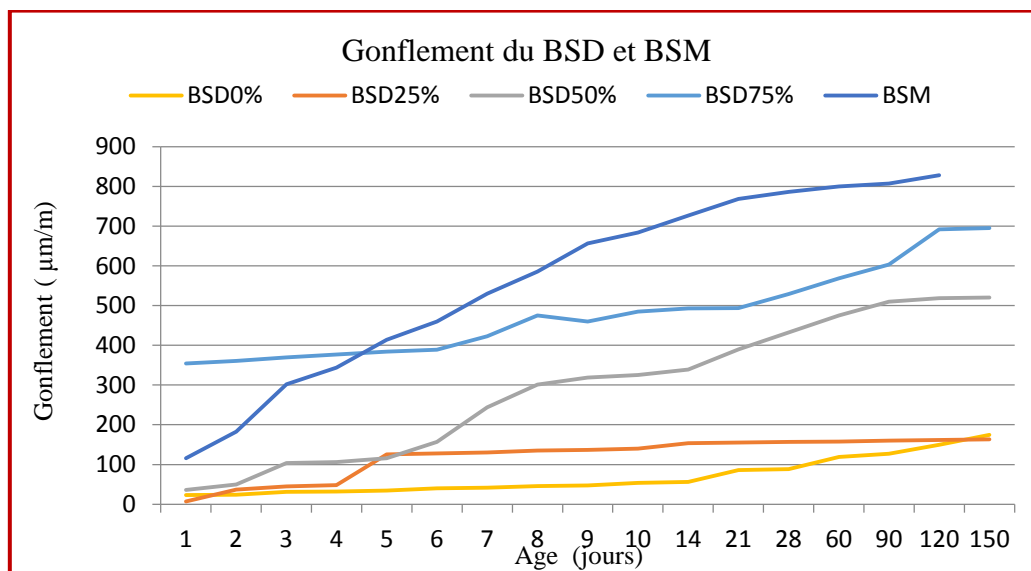


Figure IV-26: Effet du taux de substitution sur le gonflement du BSD et BSM en fonction de l'âge

Le béton de sable de dune BSD0% (figure IV-26) a donné le moindre gonflement du fait que ce même mélange a la moindre absorption par immersion. L'augmentation du taux de substitution élève le gonflement.

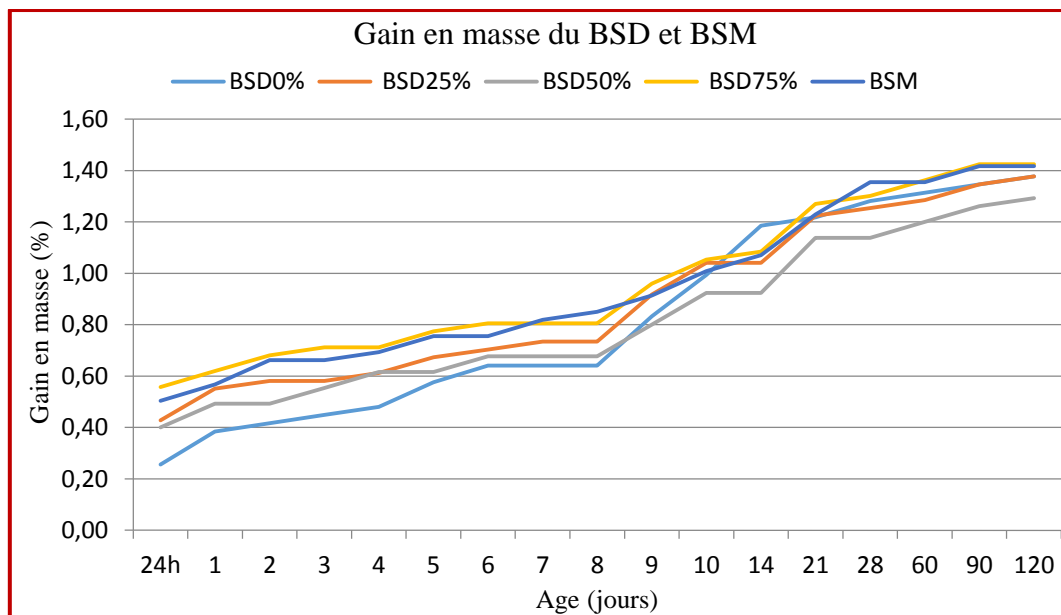


Figure IV-27: Effet du taux de substitution sur le gain en masse du BSD et BSM en fonction de l'âge

Pour le béton de sable de dune (figure IV-27), il a été constaté un maximum de gain par le BSD75%, tandis que le minimum est obtenu avec le béton témoin pendant les premiers dix jours uniquement, à partir de là le gain en masse est augmenté pour le même béton et devenu le plus important par rapport aux autres mélanges. La substitution partielle ou totale a augmenté le gain en masse du béton de sable de dune.

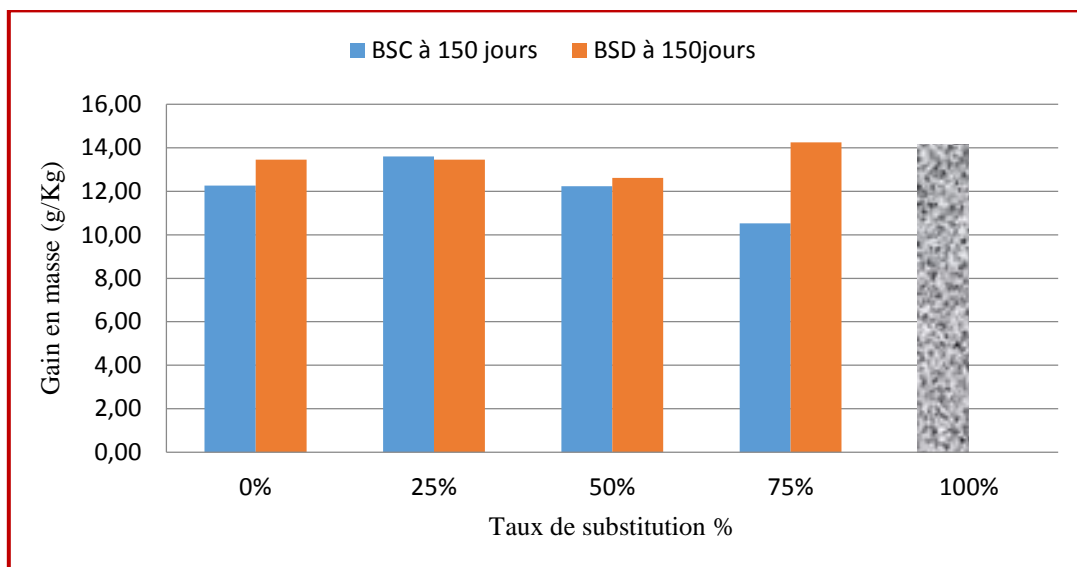


Figure IV-28: Comparaison de gain en masse en fonction du taux de substitution entre le BSC et BSD

Sur la figure IV-28, on trouve une comparaison entre le béton de sable de dune BSD, le béton de sable de carrière BSC et le béton de sable de déchet de marbre BSM, à 150jrs (dernier jour du test), il a été relevé que pour 25% de substitution du sable de carrière, le gain en masse est augmenté, mais il a diminué pour les taux de 50% et 75% respectivement. Par contre et dans le cas du béton de sable de dune, le gain en masse était presque le même avec 0% et 25% de substitution, mais il a diminué à 50% pour rehausser vers 75% pour atteindre à la fin une valeur maximale proche de celle obtenue avec le BSM.

Le moindre gain en masse est obtenu avec le BSC 75%. Ce résultat est confirmé par les résultats obtenus par l'essai de l'absorption par immersion (voir chapitre V).

IV.5. Conclusions

Différentes propriétés ont été étudiées dans ce chapitre, à l'état frais comme à l'état durci. D'après les résultats des différents essais nous avons constaté ce qui suit:

- Les caractéristiques du béton de sable à l'état frais (air occlus, ouvrabilité et densité) ont été améliorées avec la substitution partielle du sable de dune ou de carrière avec le sable de déchet de marbre;
- A l'état durci, les meilleures résistances mécaniques à la compression ont été obtenues avec un taux de substitution de 25% dans le béton de sable de carrière; tandis que la résistance à la traction par flexion était meilleure avec le béton témoin BSC0%, mais on a observé une valeur proche à 25% de taux de substitution;
- Le béton de sable de dune est moins résistant que le béton de sable de carrière, quel que soit le taux de substitution;
- Le retrait total et le retrait endogène augmentent avec l'augmentation du taux de substitution;
- Le béton de sable à base de sable de dune a marqué moins de perte en masse à l'air par rapport à celui avec le sable de carrière, il peut être dû à la capacité d'absorption d'eau du sable de carrière, donc l'évaporation de cette eau engendre une perte en masse importante;
- Contrairement à la perte en masse à l'air, le béton de sable de dune a perdu plus de masse endogène que le béton de sable de carrière;
- La substitution a augmenté le gonflement, le minimum est obtenu par le béton témoin BSC0%, et le maximum est donné par le BSM;
- L'augmentation du taux de substitution augmente le gonflement. Le béton de sable de dune BSD0% a donné le moindre gonflement du fait que ce même mélange a la moindre absorption par immersion.
- Un maximum de gain en masse est donné par le BSM, vient après le BSC25%, c'est dû à la capacité d'absorption du sable de déchet de marbre et celle du sable de carrière en même temps; le minimum de gain est obtenu avec BSC75%.

Chapitre V

Effet du taux de substitution et type de granulat sur
les paramètres de durabilité

V. Effet du taux de substitution du sable de déchets de marbre et le type de granulat sur les paramètres de durabilité

V.1. Introduction

Dans ce chapitre nous trouverons tous les résultats des paramètres de durabilité des différents bétons de sable; ces paramètres sont: l'absorption d'eau par immersion, la pénétration des chlorures et la vulnérabilité des mélanges vis-à-vis les milieux agressifs (CH_3COOH , HCl , KOH et H_2SO_4).

V.2. Effet du taux de substitution du sable de déchets de marbre et le type des granulats sur les paramètres de durabilité

V.2.1. Absorption d'eau par immersion

L'absorption par immersion caractérise les pores ouverts de la matrice cimentaire à 28 jours; la porosité ouverte est due à l'excès d'eau dans le mélange qui n'est pas entré dans l'hydratation du ciment ni absorbée par les granulats, elle dépend aussi de l'air emprisonné après vibration.

Les résultats de l'essai sont regroupés dans le tableau V-1 et représentés par la figure V-1.

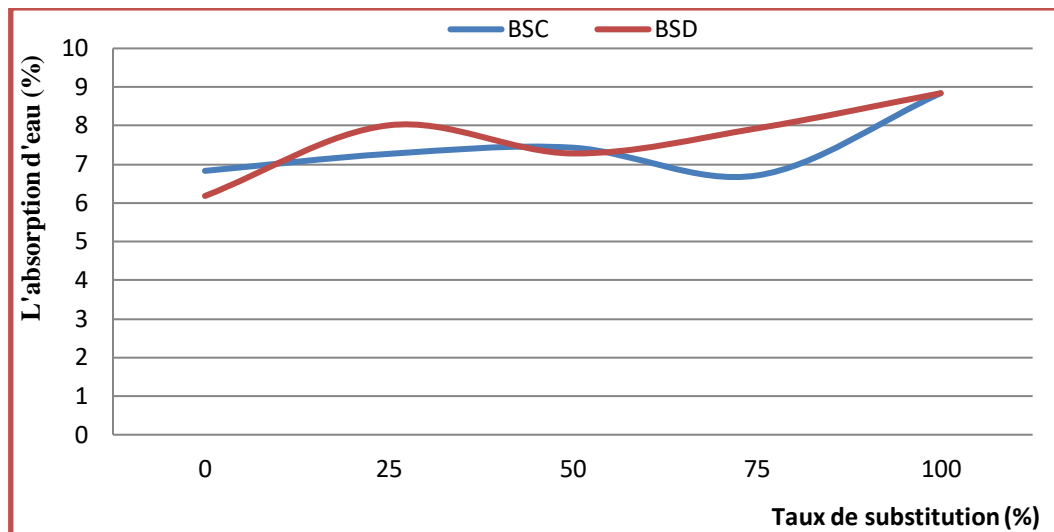


Figure V-1: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux de substitution

Les courbes de la figure V-1, présentent une tendance instable, car l'absorption de l'eau dépend des dimensions des pores, de leur distribution et de leur inter-connectivité (Aditya et al. 2015). Le maximum d'absorption est obtenu avec le béton de déchet de marbre, un résultat attendu du fait de son ouvrabilité à l'état frais (béton plastique) due à sa capacité d'absorption d'eau Gulden et al. (2015) ont trouvé que l'utilisation de déchet de marbre a positivement affectée l'absorption d'eau.

Hebhoub et al. (2020), Rihia et al. (2020) et Benhalilou et al. (2020) ont constaté que l'augmentation du taux de substitution a élevé la capacité d'absorption du mortier et surtout à 20%, à cause de la porosité engendrée par le déchet de marbre d'un côté et la présence des pores enfermés dans l'interface matrice/granulats d'un autre côté.

V.2.2. Pénétration des chlorures

La profondeur de pénétration a été établie selon la norme américaine UNI 7928 et JIS A 1171. Après une conservation dans le chlorure de sodium NaCl à différents âges (28, 56 et 90 jours), nous avons utilisé une solution de nitrates d'argent AgNO₃ à concentration 0,1N pour détecter les chlorures migrants de la solution vers le béton. Les résultats sont représentés sur la figure V-2.

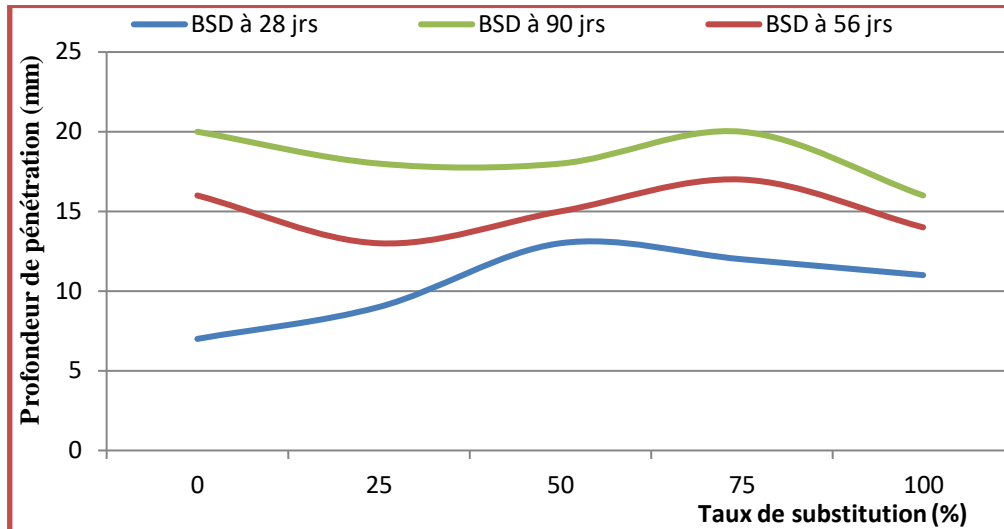


Figure V-2: Profondeur de la pénétration de chlorures au béton de sable de dune en fonction des taux de substitution

La figure V-2 montre qu'à 28 jours que la profondeur de pénétration de chlorure augmente avec l'augmentation du taux de substitution jusqu'à 50%, après elle diminue jusqu'à 100%; tandis qu'à 56 et 90 jours on trouve la même tendance, la pénétration diminue à 25% et augmente à 50% et 75%; pour diminuer à 100%. Le minimum de pénétration est obtenu avec le béton de déchet de marbre.

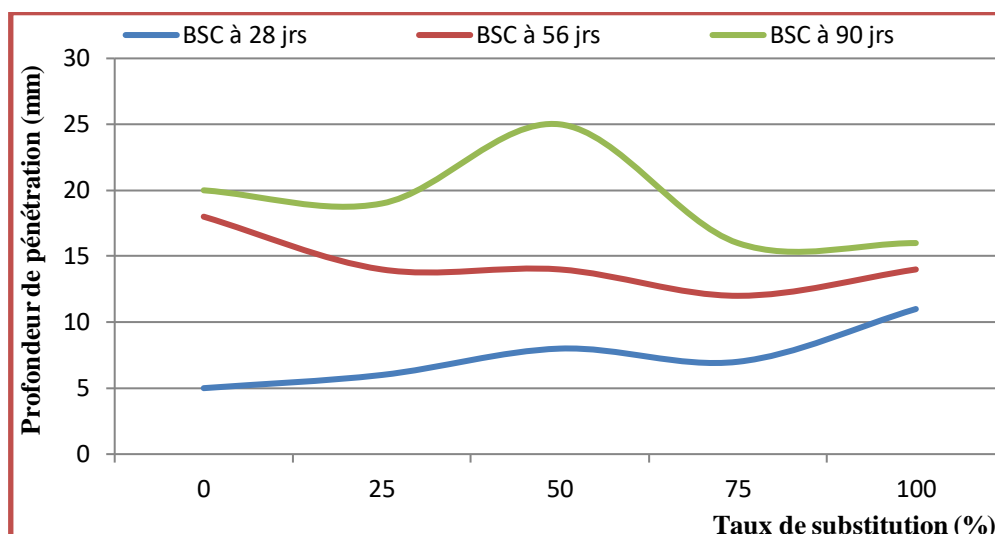
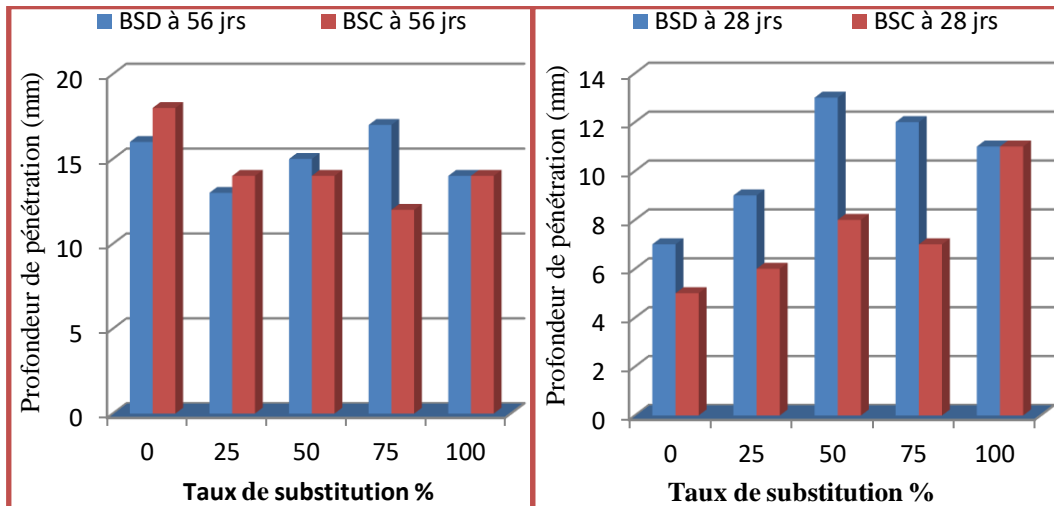


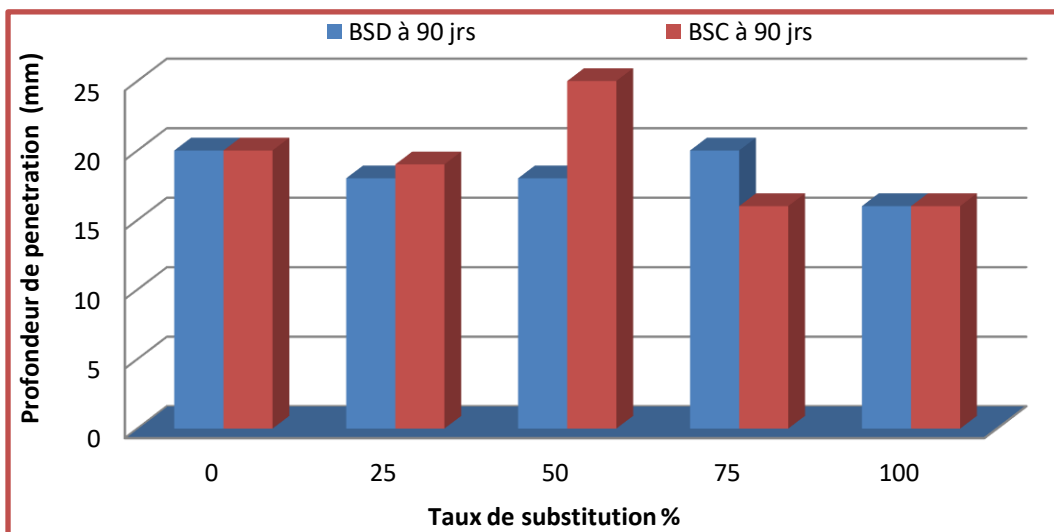
Figure V-3: Profondeur de la pénétration de chlorures au béton de sable de carrière en fonction des taux de substitution

La figure V-3 montre qu'à 28 jours que la profondeur de pénétration de chlorure augmente dans le béton de sable de carrière, avec l'augmentation du taux de substitution jusqu'à 50%, après elle diminue jusqu'à 100%; tandis qu'à 56 et 90 jours on trouve la même tendance, la pénétration diminue à 25% et augmente à 50% et 75%; pour diminuer à 100%. Le minimum de pénétration est obtenu avec le béton de déchet de marbre.



(a)

(b)



(c)

Figure V-4: Profondeur de la pénétration de chlorures dans le béton de sable en fonction de l'âge et du taux de substitution: (a) à 28 jours (b) à 56 jours (c) à 90 jours

La profondeur de pénétration la moins élevée est obtenue avec les bétons témoins BSC0% et BSD0% (figure V-4), mais elle a augmenté avec les différents taux de substitution à 28 jours alors qu'à 56 jours on observe l'effet inverse, du fait de la diminution de la capillarité selon **Gulden et al. (2016)**.

Aditya et al. (2015) ont expliqué que l'eau est le transporteur des ions de chlorure dissous, par voie capillaire dans le béton, et que l'ajout de la poudre de marbre réduit ces voies.

Rihia et al. (2020) et Rana et al. (2015) trouvent que l'introduction de 10% de sable de marbre diminue la profondeur de pénétration des chlorures, c'est dû à la diminution de passage capillaire des ions de chlorures.

V.2.3. Attaques chimiques

Afin d'évaluer le comportement du béton de sable dans les milieux agressifs, nous avons testé ce dernier avec 04 modes de conservation dans des solutions à 5% de concentration; les solutions utilisées sont: l'hydroxyde de potassium KOH, l'acide acétique H_3COOH , l'acide sulfurique H_2SO_4 et l'acide chlorhydrique HCl. La masse initiale des éprouvettes de (5x5x5) cm, est prise après la période de cure de 28jours dans l'eau de robinet.

V.2.3.1. Attaques par une solution à 5% de l'acide acétique (CH_3COOH)

La variation de la perte de masse en fonction de la période d'immersion est illustrée dans la figure V-5.

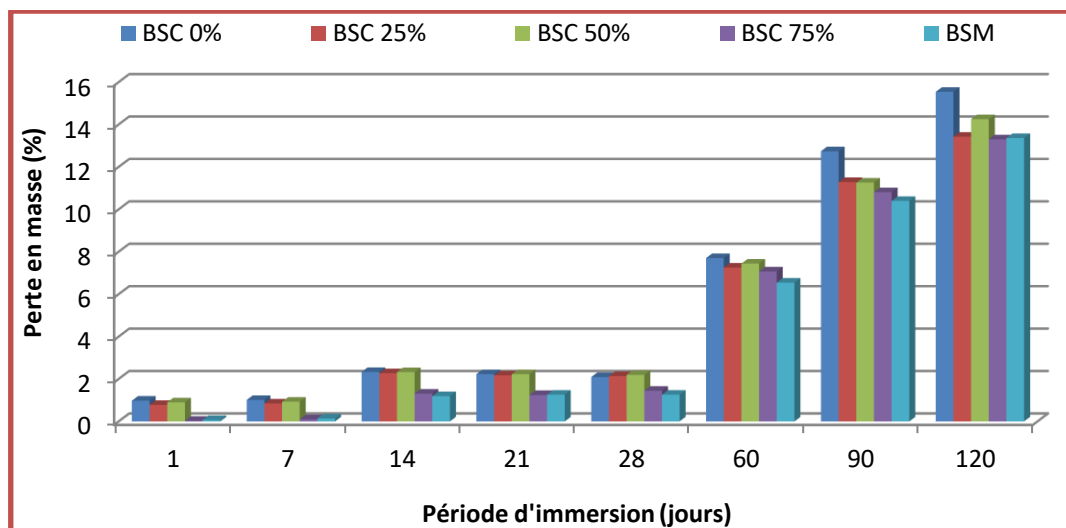


Figure V-5: Variation de la perte en masse du béton de sable de carrière en fonction de la période d'immersion dans 5% CH_3COOH

La figure V-5 montre que la perte en masse augmente avec l'âge pour tous les formulations; à jeune âge (1jour et 7jours) on voit une légère perte, à 14, 21 et 28jours, elle augmente et reste presque la même; à 60, 90 et 120jours; la perte en masse devient de plus en plus importante.

Le maximum de perte en masse est obtenu avec le béton témoin, donc le sable de carrière est plus susceptible à l'attaque chimique du CH_3COOH , alors que le minimum est obtenu avec le béton de sable de carrière à 75% de substitution, donc la substitution partielle du sable de carrière par le sable de déchet de marbre a positivement affecté la résistance aux attaques chimiques du CH_3COOH .

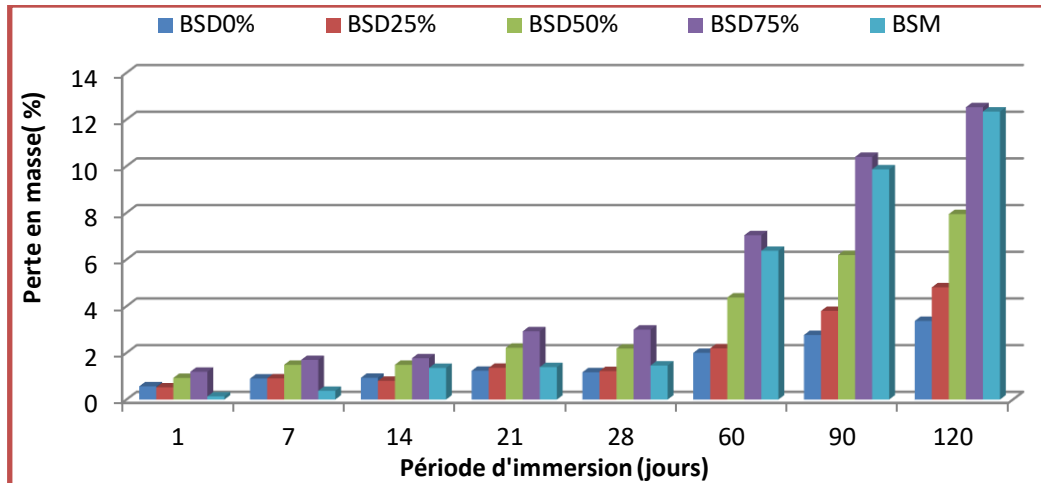


Figure V-6: Variation de la perte en masse du béton de sable de dune en fonction de la période d'immersion en 5% CH₃COOH

La figure V-6 montre que la perte en masse augmente avec l'âge pour les différents taux de substitution. Le maximum de perte est obtenu avec le béton de sable de dune à 75% de taux de substitution, tandis que le minimum est obtenu avec le béton de sable de dune témoin, donc le sable de dune seul résiste mieux à l'attaque chimique du CH₃COOH, c'est l'inverse de ce qui a été observé avec le sable de carrière.

Le béton de sable de déchet marbre BSM avait une perte de masse assez importante.

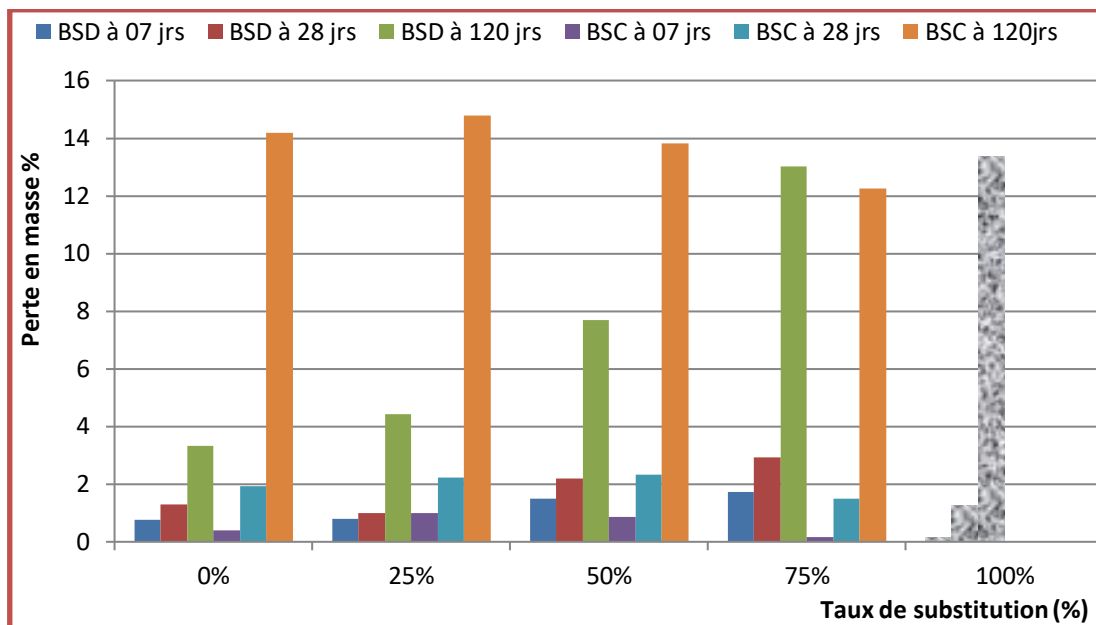


Figure V- 7: Comparaison de la perte en masse entre le BSD et BSC due au CH₃COOH, en fonction du taux de substitution et l'âge.

La perte en masse du BSC à 120jrs dépasse 10% pour toutes les formulations (figure V-7), alors qu'elle est inférieure à 10% pour le BSD0%, BSD25% et BSD50%, on constate qu'à 75% de substitution les deux mélanges ont presque perdue la même masse que le béton de sable de déchet marbre, donc on peut dire que dans la solution CH₃COOH, la vulnérabilité

des mélanges augmente avec l'augmentation du taux de substitution, mais elle est plus importante dans le BSC.

V.2.3.2. Attaques par une solution de 5% de l'acide chlorhydrique (HCl)

Sur la figure V-8 on présente la variation de la perte de masse dans les bétons de sables de dune en fonction de la période d'immersion.

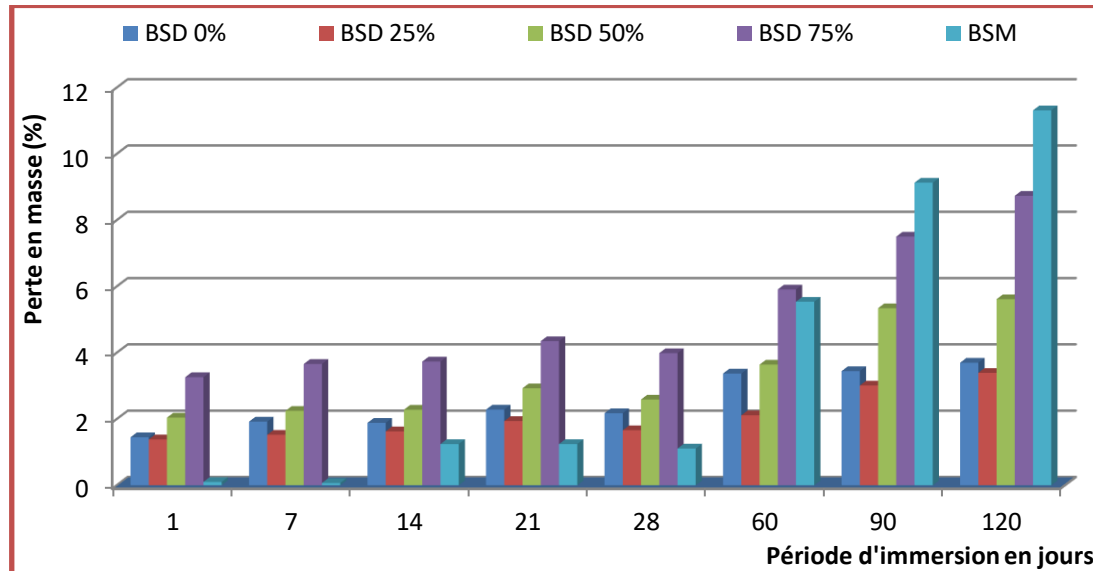
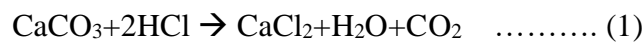
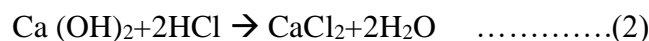


Figure V-8: Variation de la perte en masse du béton de sable de dune en fonction de la période d'immersion dans 5% HCl

La figure V-8 montre qu'à jeune âge (1jour et 7jours) la perte de masse du béton à base de sable de déchet de marbre est insignifiante, à moyen âge (14, 21 et 28jours), elle augmente mais elle reste la moins importante par rapport aux autres mélanges; mais à partir de 60 jours; elle représente le maximum de perte. La moindre perte en masse a été enregistrée avec le béton de sable de dune à 25% de substitution. Donc c'est le mélange le plus résistant à l'attaque chimique du HCl. On en déduit que la perte en masse augmente avec l'augmentation du taux de substitution, ce qui a été observé par **Rajendra et al. (2017)** ils ont utilisé un sable de rivière, il a expliqué que la teneur en carbonates dans le marbre augmente la capacité du mortier à réagir avec l'acide selon l'équation (1):



Le ciment réagit avec le HCl selon l'équation (2):



Le chlorure de calcium casse la dissolution du ciment, la production des sels CaCl_2 augmente la porosité car ils sont solubles dans l'eau.

Benhalilou et al. (2020) le béton de sable contenant 5% de déchet de marbre a donné une meilleure résistance à l'acide chlorhydrique.

La perte de masse des bétons à base de sable de carrière dans la solution de 5% d'acide chlorhydrique est donnée par la figure V-9.

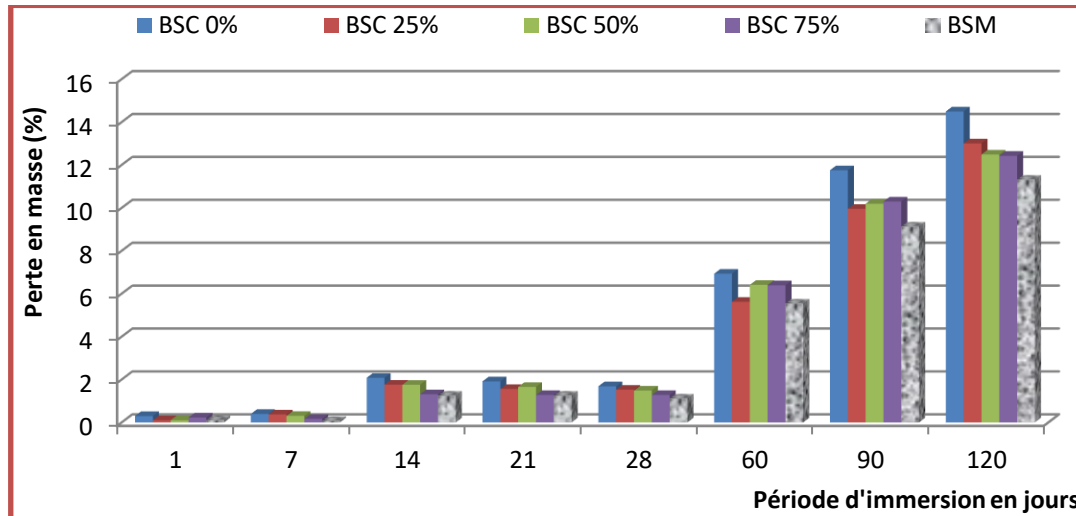


Figure V-9: Variation de la perte en masse du béton de sable de carrière en fonction de la période d'immersion dans 5% HCl

La figure V-9 montre qu'à jeune âge (1 et 7 jours) les échantillons n'ont pas vraiment réagi avec la solution du HCl, à moyen âge (14; 21 et 28 jours) une légère perte a été enregistrée (inférieure à 5%), au-delà de 60 jours de conservation, la perte en masse est de plus en plus importante, le maximum est obtenu avec le béton de sable de carrière témoin, tandis que les autres mélanges (BSC50% et BSC75%) ont eu presque la même perte en masse, le BSM est le moins vulnérable.

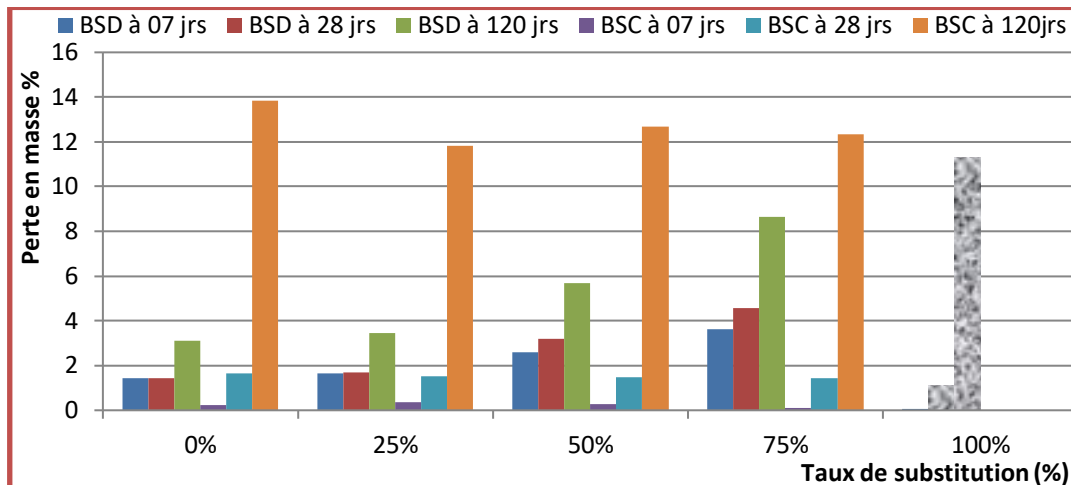


Figure V-10: Comparaison de la perte en masse entre le BSD et BSC due au HCl, en fonction du taux de substitution et l'âge.

On peut dire que l'ajout du sable de déchet de marbre a amélioré la résistance chimique à l'acide chlorhydrique du béton de sable de carrière. Ceci est conforme aux résultats de **Boulkhal et al. (2019)** qui ont trouvé que l'ajout de la poudre de marbre dans un mortier engendre une bonne résistance à l'attaque du HCl à 1% de concentration, à cause de la finesse

de cette poudre, ils expliquent que la réduction de la quantité de ciment diminue la quantité de l'hydroxyde de calcium, qui est l'élément le plus vulnérable à l'attaque de l'acide (HCl).

Une autre raison qui explique la meilleure performance du déchet de marbre est la présence d'une grande quantité du CaCO_3 qui diminue la capacité du mélange à consommer plus d'acide.

On voit clairement dans la figure V-10 que La perte en masse du BSC à 120jours dépasse 10% pour tous les taux de substitution, alors qu'elle est inférieure à 10% pour le BSD, on constate que le BSC témoin est le plus vulnérable à l'attaque du HCl comparant au BSD. On voit aussi que béton de sable de dune témoin est le moins détérioré par le HCl.

Kherraf et al. (2019) ont expliqué que l'hydratation du ciment portland dégage une partie de l'hydroxyde de calcium.

V.2.3.3. Attaques par une solution de 5% d'hydroxyde de potassium (KOH)

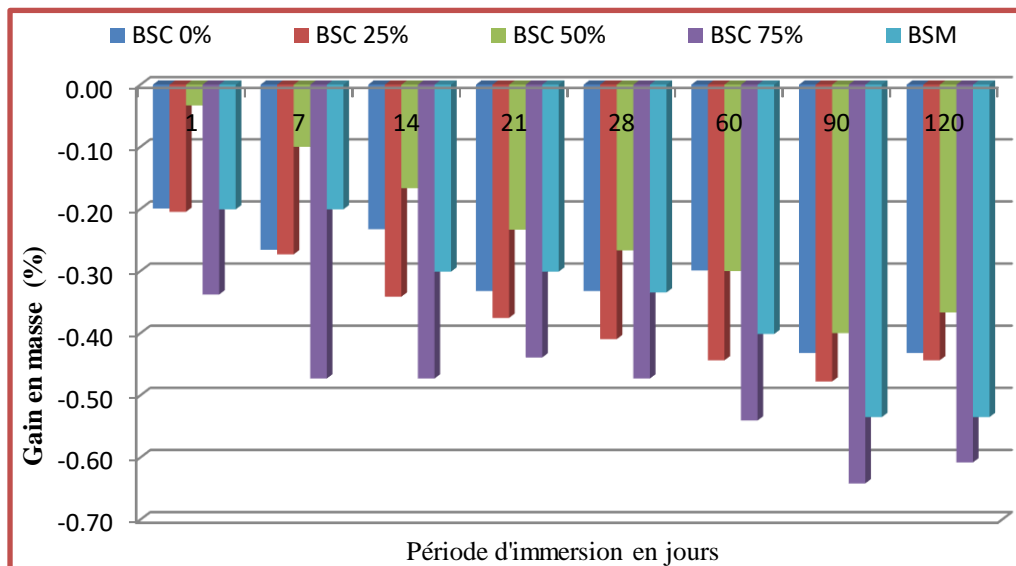


Figure V-11: Variation du gain en masse du béton de sable de carrière en fonction de la période d'immersion dans 5% KOH

La figure V-11 montre des valeurs négatives, elles représentent un gain en masse dont le maximum est obtenu avec le BSC 75%. par contre le BSC50% représente le minimum de gain en masse avec le KOH, donc il n'y a pas eu d'attaque chimique par la solution basique

Des valeurs négatives sur la figure V-12, représentent un gain en masse dont le maximum est obtenu avec le BSD 0%. par contre le BSD 75% et BSD100% représentent le minimum de gain en masse avec le KOH, donc il y a eu un gonflement.

On note aussi que l'absorption n'a pas eu lieu dès le premier jour de conservation contrairement aux BSD0% et BSD25%.

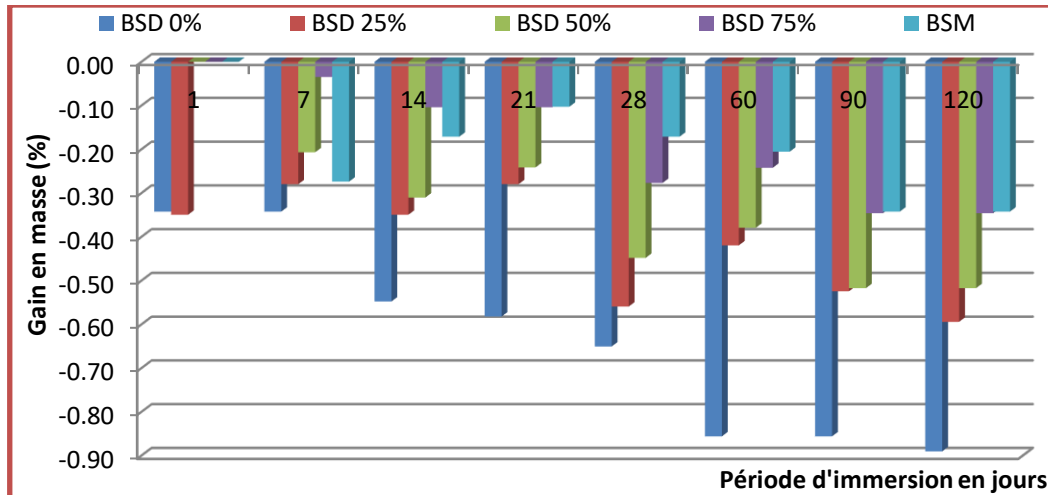


Figure V-12 : Variation du gain en masse du béton de sable de dune en fonction de la période d'immersion dans 5% KOH

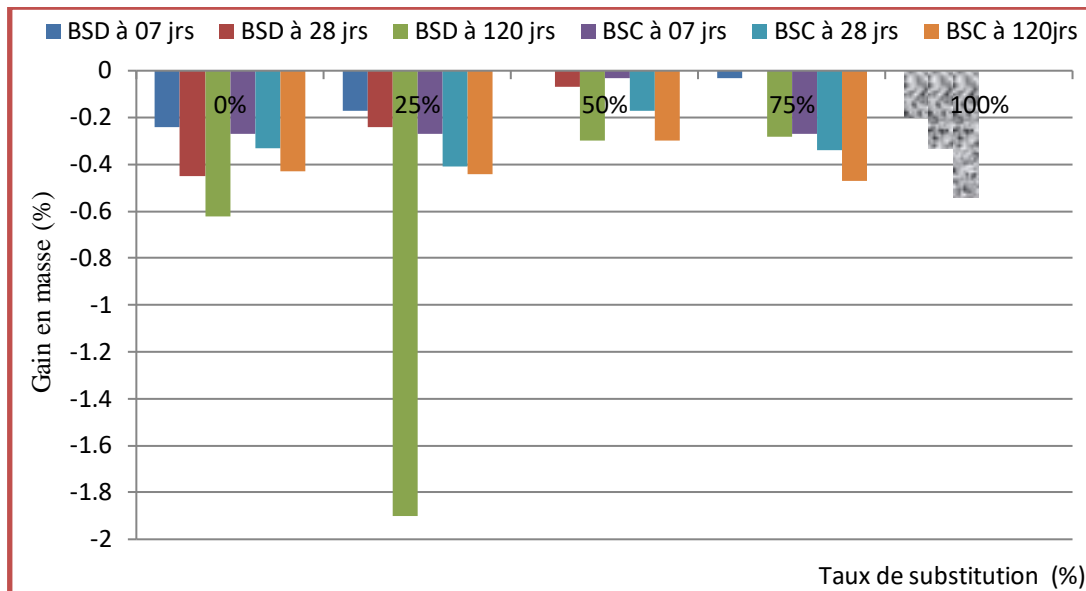


Figure V-13: Comparaison du gain en masse dû au KOH entre le BSD et BSC en fonction du taux de substitution et l'âge.

D'après la figure V-13 il y'a eu un gonflement de tous les mélanges dès le jeune âge, le BSD gonfle plus que le BSC, sauf pour 75% on voit l'inverse,

V.2.3.4. Attaques chimiques par une solution de 5% de l'acide sulfurique H₂SO₄

Les sulfates ont plusieurs origines, Naturelles, organiques et industrielles (Regourd, 1983) et (Gagné, 2000);

Le sol contient le gypse (CaSO₄.2H₂O), d'où le sulfate avec une grande concentration (>5%) peut causer la dégradation du béton. de même les sols argileux peuvent contenir la pyrite FeS₂

qui s'oxyde et donne les sulfates, une fois en contact avec l'air et l'humidité, ces derniers forment l'acide sulfurique.

L'origine biologique: la décomposition des matières organiques dans les silos et les bacs de stockage et dans l'assainissement peuvent causer la formation de l'hydrogène sulfuré (H_2S : un gaz très toxique), dans le béton les bactéries anaérobiques convertissent les sulfates SO_4^{2-} pour former H_2S qui se libère en surface. A la surface et avec la bactérie aérienne H_2S est alors décomposé à la forme du sulfure, ce dernier est éventuellement converti en H_2SO_4 qui est un acide fort et très corrosif pour le béton.

Par ailleurs, l'industrie chimique comme les usines de batteries de véhicules, diffusent dans l'air le dioxyde de sulfure (SO_2) résultant de la dissolution du H_2SO_4 . Ce gaz engendre la diminution des performances mécaniques du béton (Tennich al., 2015).

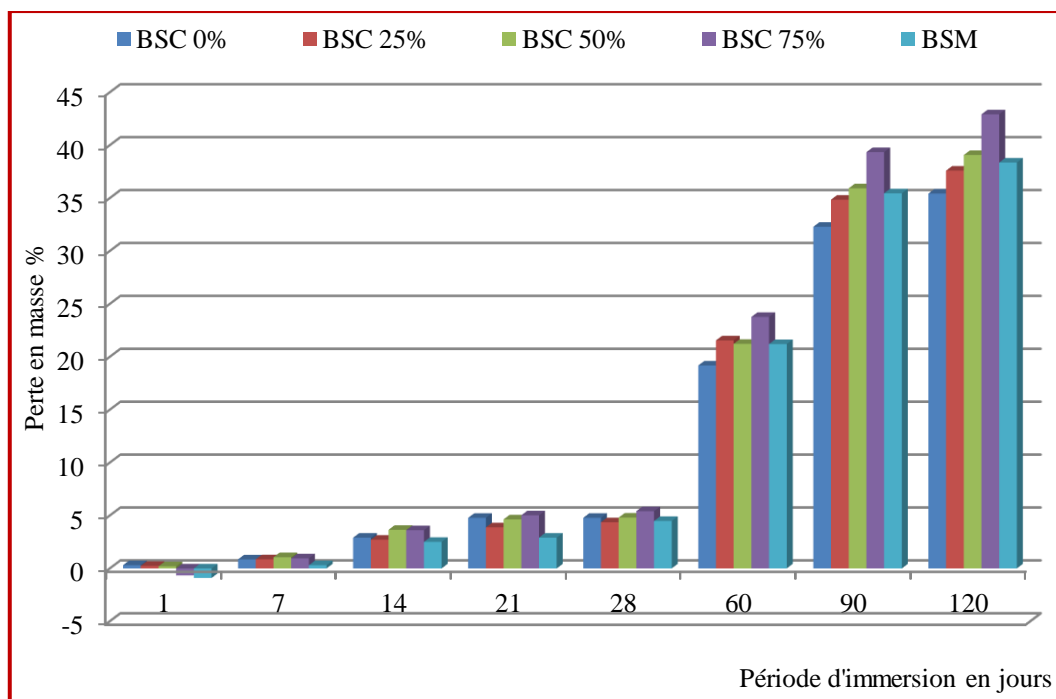


Figure V-14: Variation de la perte en masse du béton de sable de carrière en fonction de la période d'immersion dans 5% H_2SO_4

La figure V-14 montre qu'à jeune âge (1 et 7 jours) la perte en masse est insignifiante et même il y a eu un petit gain concernant le BSC50% et BSC75%; à moyen âge (14; 21 et 28 jours) une légère augmentation est observée, elle est restée presque la même durant les quatorze jours de conservation; au-delà de 60 jours l'attaque chimique de l'acide sulfurique est de plus en plus importante. Le maximum de perte en masse est obtenu par le mélange BSC75%, tandis que le minimum est donné par le mélange témoin BSC0%. Dans ce cas de figure le sable de déchet de marbre n'a pas amélioré la résistance aux attaques chimiques de l'acide sulfurique.

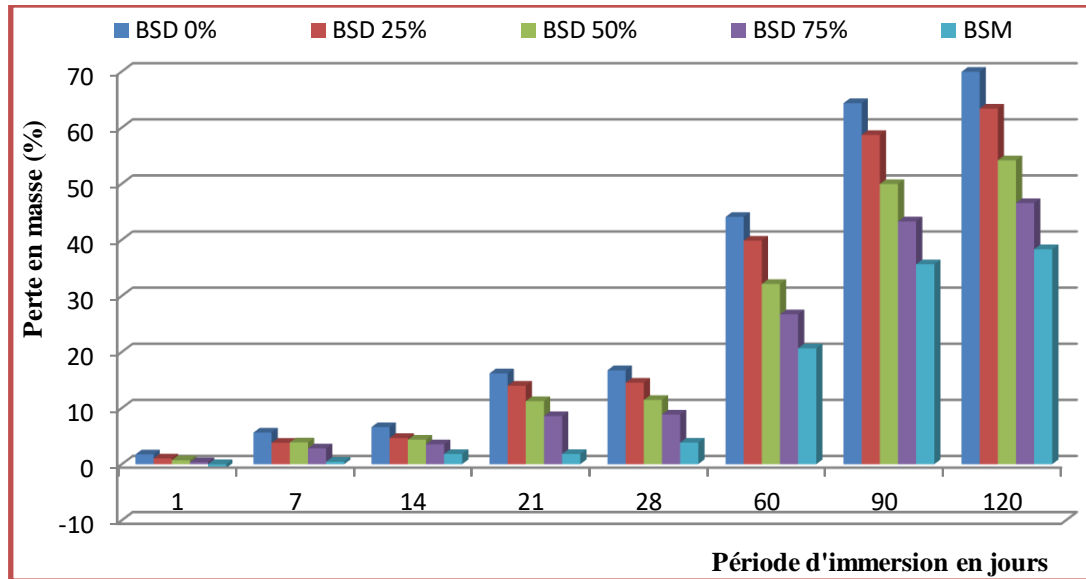


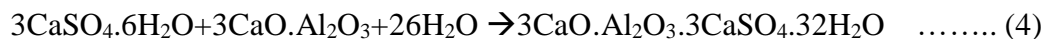
Figure V-15 : Variation de la perte en masse du béton de sable de dune en fonction de la période d'immersion dans 5% H₂SO₄

La figure V-15 montre qu'à jeune âge (1 et 7 jours) la perte en masse est insignifiante et même il y a eu un petit gain (valeurs négatives) concernant le BSD75% et BSD100% au premier jour; à 14 jours une légère augmentation de la perte en masse est notée, celle-ci continue d'augmenter et reste presque la même à 21 et 28 jours; à partir de 60 jours l'attaque chimique de l'acide sulfurique est de plus en plus importante.

Le maximum de perte en masse est obtenu par le mélange BSD0%, tandis que le minimum est donné par le béton de sable de déchet de marbre BSM. La substitution totale par le sable de déchet de marbre a donné une meilleure résistance aux attaques chimiques de l'acide sulfurique, par rapport aux bétons substitués partiellement. (Khyaliya et al., 2017) montrent, quand le mélange est attaqué par H₂SO₄, il réagit avec la portlandite Ca(OH)₂ qui résulte de l'hydratation du ciment, ce qui donne le gypse (équation 3):



Aussi, Il a relevé que le bas pourcentage des aluminates Al₂O₃ dans le déchet de marbre diminue la formation du C3A, qui réagit avec le gypse pour produire l'étringite, c'est pourquoi l'augmentation du déchet de marbre diminue la perte en masse (équation 4).



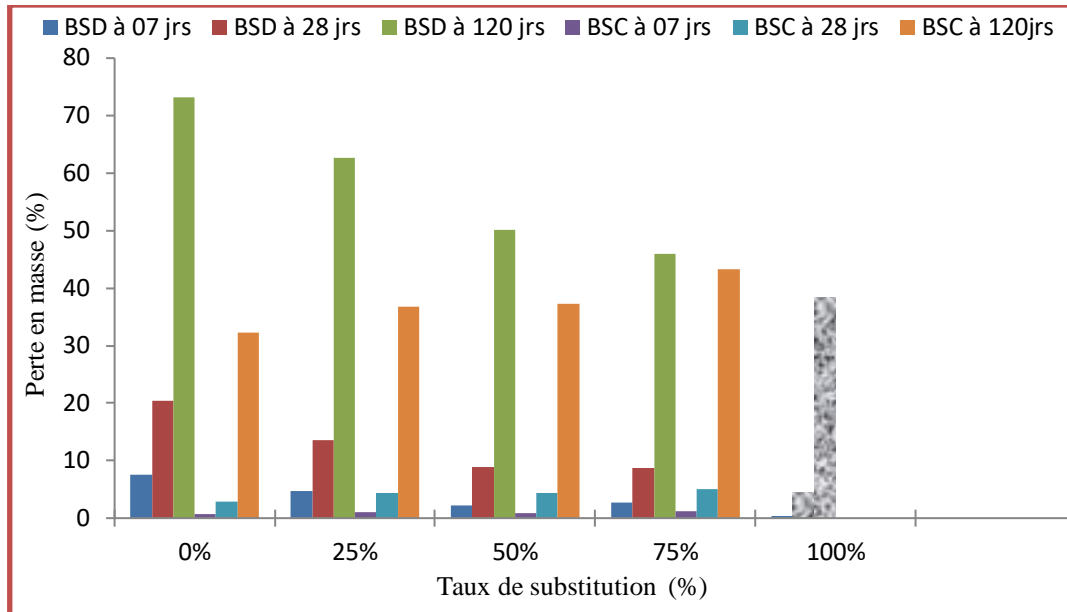


Figure V-16: Comparaison de la perte en masse entre le BSD et BSC due au H_2SO_4 en fonction du taux de substitution et l'âge.

L'attaque chimique du H_2SO_4 (figure V-16) est plus importante dans le BSD, plus on augmente le taux de substitution l'écart diminue entre les deux types de béton, et la vulnérabilité devient presque la même à 75% et 100%, on voit aussi que la présence du sable de déchets marbre dans le BSD a amélioré sa résistance à l'acide sulfurique contrairement à son effet dans le BSC. En regardant le résultat donné par le BSM, on peut déduire que la résistance à l'attaque chimique du H_2SO_4 est améliorée par la présence du sable de déchet de marbre.

Boukhelkhal et al. (2019) expliquent que le mélange contenant la poudre de marbre augmente sa capacité à résister du H_2SO_4 , ils ont observé que la perte en masse observée après 07 jours d'immersion dans H_2SO_4 est due à la dissolution de la couche de surface causé par les ions H^+ de l'acide sulfurique qui dissout le $CaCO_3$ et $Ca(OH)_2$, avec la réaction simultanée du SO_4^{2-} avec Ca^{2++} due au gypse déposé sur la surface des éprouvettes.

La détérioration dans l'acide sulfurique est moins affectée par la composition du mélange ou la porosité, car il a commencé par dissoudre la couche de surface de l'échantillon.

Benhalilou et al. (2020) la meilleure résistance à l'effet de l'acide sulfurique est obtenue par le mélange du béton de sable de dune avec 15% de taux de substitution.

V.3. Conclusions

L'absorption d'eau par immersion, la pénétration de chlorures et l'attaque chimique, ont été évaluées, comme étant indicateurs de durabilité; nous avons alors tiré les conclusions suivantes:

- La substitution partielle a négativement influencé la pénétration des chlorures, ainsi que l'absorption d'eau ;

- La substitution partielle du sable de carrière par le sable de déchet de marbre a positivement affecté la résistance aux attaques chimiques du CH_3COOH ;
- Le béton de sable de dune seul résiste mieux à l'attaque chimique du CH_3COOH , la substitution partielle par le sable de déchets de marbre lui rend vulnérable;
- Le béton de sable de dune à 25% de substitution, est le mélange le plus résistant à l'attaque chimique du HCl ;
- Le béton de sable à base de sable de dune et sable de carrière ont gonflé dans la solution basique KOH , même avec les différents taux de substitution;
- Le maximum de perte en masse est obtenu par le mélange BSC75%, tandis que le minimum est donné par le mélange témoin BSC0%. Dans ce cas de figure le sable de déchet de marbre n'a pas amélioré la résistance aux attaques chimiques de l'acide sulfurique;
- Le maximum de perte en masse est obtenu par le mélange BSD0%, tandis que le minimum est donné par le béton de sable de déchet de marbre BSM. La substitution totale par le sable de déchet de marbre a donné une meilleure résistance aux attaques chimiques de l'acide sulfurique H_2SO_4 , par rapport aux substitutions partielles.

Conclusions générales

Recommandations et perspectives

Conclusions, recommandations et perspectives

Cette étude avait pour objectif de comparer les propriétés physiques, mécaniques et celles de durabilité des bétons de sable à base de deux types de sable (dunaire et concassé) substitués en volume avec un sable de déchet de marbre selon des pourcentages allant du 25% à 100%.

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

-A l'état frais, les meilleures ouvrabilités ont été données par les mélanges BSC75%, BSD0% et BSD75%. Avec une consistance très plastique.

Le BSC25% et BSD75% ont marqué le moindre volume en air occlus, ils sont les plus compacts, quant à la densité on a constaté que le béton de sable de carrière et le béton de sable de dune avec respectivement 25% et 50% de déchet de marbre (BSC25% et BSD50%), sont les mélanges les plus denses.

-A l'état durci; les meilleures résistances mécaniques à la compression ont été obtenues avec un taux de substitution de 25% dans le béton de sable de carrière (BSC25%); tandis que la résistance à la traction par flexion était meilleure avec le béton témoin (BSC0%), nous avons constaté aussi que le béton de sable de dune est moins résistant que le béton de sable de carrière, même avec la substitution.

L'étude de variation pondérale et dimensionnelle nous a menés aux conclusions suivantes:

-Le retrait total et le retrait endogène augmentent avec l'augmentation du taux de substitution;

-Le béton de sable à base de sable de dune a marqué moins de perte en masse à l'air par rapport à celui avec le sable de carrière, il peut être dû à la capacité d'absorption d'eau du sable de carrière, donc l'évaporation de cette eau engendre une perte en masse importante;

-Contrairement à la perte en masse à l'air, le béton de sable de dune a perdu plus de masse endogène que le béton de sable de carrière;

-La substitution a augmenté le gonflement, le minimum est obtenu par le béton témoin BSC0%, et le maximum est donné par le BSM;

-L'augmentation du taux de substitution augmente le gonflement. Le béton de sable de dune BSD0% a donné le moindre gonflement du fait que ce même mélange a la moindre absorption par immersion;

-Un maximum de gain en masse est donné par le BSM, vient après le BSC25%, c'est dû à la capacité d'absorption du sable de déchet de marbre et celle du sable de carrière en même temps; le minimum de gain est obtenu avec BSC75%;

-Le moindre gain en masse est obtenu avec le BSC 75%;

-En comparant entre le béton de sable de dune (BSD), le béton de sable de carrière (BSC) et le béton de sable de déchet de marbre (BSM), à 150jours (dernier jour du test), nous avons relevé que pour les deux types de sable, le gain en masse est presque identique, une différence

est apparue avec le taux de substitution de 75%, on a vu que le BSD a gagné plus de masse par rapport au BSC.

L'absorption d'eau par immersion, la pénétration des chlorures et l'attaque chimique, ont été évaluées, comme étant indicateurs de durabilité; nous avons alors tiré les conclusions suivantes:

-La substitution partielle a négativement influencé la pénétration des chlorures, ainsi que l'absorption d'eau par immersion.

-La substitution partielle du sable de carrière (BSC) par le sable de déchet de marbre a positivement affecté la résistance aux attaques chimiques du CH_3COOH .

-Le béton de sable de dune seul (BSD0%) résiste le mieux à l'attaque chimique du CH_3COOH , la substitution partielle par le sable de déchet de marbre y lui rend vulnérable.

-Le béton de sable de dune à 25% de taux de substitution, est le mélange le plus résistant à l'attaque chimique de l'acide chlorhydrique HCl.

-Le béton de sable à base de sable de dune et sable de carrière ont gonflé dans la solution basique KOH, même avec les différents taux de substitution.

-Le maximum de perte en masse est obtenu par le mélange BSC75%, tandis que le minimum est donné par le mélange témoin BSC0%. Dans ce cas le sable de déchet de marbre n'a pas amélioré la résistance aux attaques chimiques de l'acide sulfurique (H_2SO_4).

-Le maximum de perte en masse est obtenu par le béton de sable de dune témoin (BSD0%), tandis que le minimum est donné par le béton de sable de déchet de marbre (BSM). La substitution totale par le sable de déchet de marbre a donné une meilleure résistance aux attaques chimiques de l'acide sulfurique H_2SO_4 , par rapport aux substitutions partielles.

Concernant la continuité de la recherche dans le sens de la valorisation du sable de déchet de marbre, on propose les recommandations suivantes:

-Consacrer une étude à la durabilité du béton de sable à base de déchet de marbre sous différents phénomènes et milieux agressifs tels que:

- ✓ Les eaux usées.
- ✓ Aux cycles de gel - dégel.
- ✓ Aux cycles de mouillage et séchage.

-Étude des propriétés thermiques du béton à base de sable de déchet de marbre (conductivité thermique).

-Étude de l'adhérence du béton à base de sable de déchet de marbre avec les armatures.

En fin, cette étude nous a permis d'ouvrir d'autres perspectives, pour améliorer encore plus les performances du béton de sable à base de déchets de carrières (poudre de marbre), afin de contribuer à résoudre un problème à la fois environnemental et économique.

L'étude peut être complétée par une étude microscopique afin de bien comprendre quelques phénomènes sur le comportement du béton de sable vis-à-vis les milieux agressifs.

Références

bibliographiques

Références bibliographiques

Aditya Rana ,PawanKalla, Laszlo J. Csetenyi (2015), “*Sustainable Use of Marble Slurry in Concrete*”. J. Clean. Prod.94, 304-311.

Agarwal S.K., Gulati D., (2006).«*Utilisation of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars*», Construction and Building Materials, vol. 20, 2006, p. 999-1004.

Aliabdo, A.A., Abdelmoaty, Abdelmoaty M., Auda, E.,M., (2014), “*Re-use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete*”, Constr. Build. Mater., (50) 28-41.

Alyamac, K.E., Aydin, A.B., 2015. “*Concrete properties containing fine aggregate marble powder*”. KSCE J. Civ. Eng. 19, 2208e2216.

AyachiAmor (2011) « *Etude des propriétés mécaniques du béton de sable de dune* », mémoire de master, université KASDI Merbah de Ouergla

Azzouz.L., Kenai.S. et Bouhicha.M., (2002): «*Comportement physico mécanique du béton de sable dunaire avec additions calcaires*» Communication en 2^{ème} colloque maghrébin Biskra P(111-118).

Bacarji, E., Toledo Filho, R.D., Koenders, E.A.B., Figueiredo, E.P., Lopes, J.L.M.P. “*Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers*”. Construction and Building Materials 45 (2013) 1–10.

Belaidi, A.S.E., Azzouz,L, Kadri.E, Kenai.S (2012), “*Effect of Natural Pozzolana and Marble Powder on the Properties of Self-compacting Concrete*”, Constr. Build. Mater., (31) 251–257.

Belferrag Alloua, (2006).«*Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dune* », mémoire de master, université KASDI Merbah de Ouergla

Benaissa, A., 1992 «*Déformations différées d'un béton de sable* »; Thèse de doctorat ;Université de bordeaux ; Laboratoire régional des ponts et chaussées.

Benhalilou.M.I.,Belachia.M., Houari.H., Abdelouahed.A.,(2020),“*The study of the characteristics of sand concrete based on marble waste sand*”,Civil And Environmental Engineering Reports, DOI: 10.2478/ceer-2020-0010.

Bernard, O., Denarié, E., Brühwiler, E., (2001) « *Comportement au jeune âge du béton et limitation de la fissuration traversant des structures hybrides* », Office fédéral des routes, MCS-EPFL, 1997/064 (82/97), 116, Lausanne, Suisse, 2001.

Binici H, Kaplan H, Yilmaz.S (2007), “*Influence of Marble and Limestone Dusts as Additives on Some Mechanical Properties of Concrete*”, Sci. Res Essay, 2(9):372–9.

Binici, H., Shahb, T., Aksogan, O., & Kaplan, H. (2008). “*Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates*”. Journal of materials processing technology, 208, 299-308.

Bouhamou.N,(2014), “*Etude du comportement d’un béton autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait*” Colloque 01 Ecomatériaux, Matériaux 24-28 Novembre 2014.

Boukhelkhal, A., Azzouz, L., Belaidi, A.S.E., Benabed, B., (2016). “*Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete*”. J. Adhes. Sci. Technol. 30, 2405-2419.

Béton de sable (Juin 1995) NF P 18-500.

CEBTP, Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics (1986). « *Synthèse des connaissances du béton de sable* », opération 52G119 Décembre 1986, France.

Celik, M.Y., Sabah, E., (2008). “*Geological and technical characterisation of Iscehisar (afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution*”, J. Environ.Manage. 87, 106-116.

Ceylan.H&Manca.S.(2013). “*Evaluation of Concrete Aggregate Marble Pieces*”, SDU. J. Tech. Sci. 3, 21-25

Chalarem. N.,(2016), « *Caractérisation des BAP à base de sédiments de dragage vis-à-vis du retrait au jeune âge* », Mémoire de fin d’études Master Académique Université des sciences et de technologie, Mostaganem.

Chaouch.A.A., (1993), « *Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes*», mémoire de magistère, ENP, Alger, 1993

Chauvillard, G.bassuyaux, (1996)« *Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées* » Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°205, Sept. - oct. 1996.

Chauvin, J.J. (1991). « *Béton de sable en Union Soviétique* » ; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n°174, juill. - août 1991.

Corinaldesi, V., Giacomo, M., Naik,T (2010), “*Characterization of Marble Powder for its Use in Mortar and Concrete*”, Constr. Build. Mater.,24 113–117

Demirel,B (2010) “*The Effect of the Using Waste Marble Dust, as Fine Sand on the Mechanical Properties of the Concrete*”, Int. J. Phys. Sci. 5 1372–1380.

Desmyter, J. et franssens,M.(1997), La directive européenne « *Produits de construction* » : nouveauté dans la réglementation sur la protection de l’environnement. Bruxelles, CSTC-Magazine, n°2, Juin 1997.

Djebien,R. Hebhouh,H. Belachia, M. Berdoudi, S. and Kherraf, L (2018), “*Incorporation of Marble Waste as Sand in Formulation of Self-compacting Concrete*” ; Struct. Eng. Mech., Vol. 67, No. 1 87-91

Djebien,R. Belachia,M. and Hebhouh,H (2015), “*Effect of Marble Waste Fines on Rheological and Hardened Properties of Sand Concrete*”, *Struct. Eng. Mech.*, 53(6), 1241-1251.

Dreux,G and Feasta,J. (1996), « *Nouveau Guide du Béton et de Ses Constituants* », Édition Eyrolles, Paris, France.

ENAMARBRE, Entreprise Nationale de Marbre (2015), WWW.ENAMARBRE.dz.

Gagné.R, (2000) ; « *Durabilité et réparations du béton* », Course guide, GCI-714, Université de Sherbrooke, 2000, pp. 160–185.

Guenoun.R., (2003), « *Etude et formulation d’un béton de sable de dune* », P.F.E, ENP, Alger, Algérie.

Guinez.R, Gluais.G et Delude.P, (1984), « *les bétons de sable* » ministère de l’urbanisation et du logement, laboratoires régionaux de Bois et de Bordeaux, France.

Gulden, C.U. and Recep, A., (2015), “*Properties of Hardened Concrete Produced by Waste Marble Powder*”, *Proc.Soc. Behav.Sci.*, (19) 52181 – 2190.

Gulden,C.U., Turhan, B. and Recep, A., (2016), “*Durability Properties of Concrete Produced by Marble Waste as Aggregate or Mineral Additives*”, *Proc. Eng.* 161 543 – 548.

Hasan.S , ahanArel, (2016), “*Recyclability of waste marble in concrete production*”*Journal of Cleaner Production* 131; 179-188.

Hebhouh,H. Belachia,M. (2011) “*Use of the Marble Wastes in the Hydraulic Concrete*”, *Nat.Tech.Rev*, N° 04/January. 41-46

Hebhouh,H., Aoun,H., Belachia,M.,Houari,H. and Ghorbel,E. (2011), “*Use of Waste MarbleAggregates in Concrete, Constr. Build. Mater.*,25 1167-1171.

Hebhouh,H., Belachia,M. and Djebien,R. (2014), “*Introduction of Sand Marble Wastes in the Composition of Mortar*”, *Struct. Eng. Mech.*, Vol. 49, No. 4. 491-498

Hebhouh Houria, Kherraf Leila, Abdelouahed Assiaand BelachiaMouloud, (2020) “*Introduction of marblwaste sand in the composition of mortar*”DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91254>

José Oliveira.M, (2017), “*Shrinkage of self–compacting concrete. A comparative analysis CEPAC*”, University of the Algarve, Faro, Portugal, January Pages 117-124

Kherraf , H. Hebhouh , M. Belachia , A. Abdelouehed , R. Charime , O. Bouhebila (2019), “*Influence of the Incorporation of Cement Kiln Dust on the Properties of CementPerformance and Durability*” *International Review of Civil Engineering (I.R.E.C.E.)*, Vol. 10, N°3

- Khyalia,R., Syed Ahmed Kabeer,K. I.,Vyas, A., (2017).“Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste”. *Construction and Building Materials* 147:598-607.
- KursatEsatAlyamac , EhsanGhafari, RagipInce, “*Development of eco-efficient self - compacting concrete with waste marble powder using the response surface method*” , *Journal of Cleaner Production* 144 (2017) 192-202
- Maillot.R., (2001),« *Mémento technique des granulats* », les presses de l'école des mines, Paris.
- Malou, M., (2007).“*Influence de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire*”Thèse de doctorat d'état, Université Mentouri de Constantine.
- Manpreet,S., Anshuman,S.andDipendu, B. (2017), “*An Investigation on Effect of Partial Replacement of Cement by Waste Marble Slurry*”, *Constr. Build. Mater.*,134 471-488.
- Manuel Sardinha, Jorge de Brito, Ricardo Rodrigues, (2016), “*Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge*”, *Construction and Building Materials* 119 (2016) 45-52
- Menou.A., (2004), « *Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multi échelles de l'endommagement thermique* ».Thèse de doctorat en Mécanique des solides, Université de Pau, France.
- Messaoudene, I., Jauberthie, R., Naceri, A., (2011). « *Influence des fillers de calcite sur le comportement des mortiers au jeune âge* »XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.
- Neville.A.M., (2000), « *Propriétés des bétons* », édition EYROLLES, Paris, France2000p. 285.
- Omar,M.O., Ghada,D.A.E., Mohamed,A.Sherif and Hassan,A.M., (2012), “*Influence of Limestone Waste as Partial Replacement Material for Sand and Marble Powder in Concrete Properties*”, *HBRC Journal* 8, 193-203
- Regourd. M., (1983) “*Durability, physico-chemical and biological processes related to concrete, Durability of Concrete structures*”, in: CEB-RILEM International Workshop, Copenhagen, pp. 49–71.
- RezigSalima, (2012) ; «*Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux* » ;Mémoire de magister ; Université de Biskra.
- Rihia.C.Hebhoub.H., Kherraf.L., Djebien. R., Abdelouahed.A., (2020), “*Valorization Of Waste In Sand Concrete Based On Plant Fibres*”, *Civil And Environmental Engineering Reports*, DOI: 10.2478/ceer-2019-0043.

Rodrigues,R., De Brito,J. and Sardinha,M., (2015), “*Mechanical Properties of Structural Concrete Containing Very Fine Aggregates From Marble Cutting Sludge*”, *Constr. Build. Mater.*, 77 349–356.

SABLOCRETE (1994), “*Sand Concrete: characteristics and practices of use*”, Press of the national school of the bridges and roads, France.

Sadek, D.M., El-Attar, M.M., Ali, H.A., 2016.“*Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development*”. *J. Clean. Prod.* 121,19-32.

Sardinha.M., de Brito.J. andRodrigues.R.,(2016). “*Durability properties of structuralconcrete containing very fine aggregates of marble sludge*”. *Const. Build. Mater.*, 119, 45-52.

Talah, A., Kharchi, F., Chaid, R. (2014). “*Influence of marble powder on high performance concrete behavior*”, *Procedia Eng.* 114 (2014) 685–690.

Tayfun, U., Topçu, I. B., Çelik, A.G., (2014)“*Use of waste marble and recycled aggregates in self-compactingconcrete for environmental sustainability*” *Journal of Cleaner Production* 84 (2014) 691e700.

TebbalNadia, (2017). « *Effet de la nature des granulats sur les propriétés physicomécaniques et durabilité d'un béton à haute performance* » thèse de doctorat en sciences, université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Tennich.M, Kallel.A, Ben Ouezdou.M., (2015), “*Incorporation of fillersfrommarble and tilewastes in the composition of self-compacting concretes*”, *Constr. Build.Mater.* 91, 65–70.

Topçu, I.B., Bilir, T., (2009).“*Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete*”.*Mater. Des.* 30, 3056-3065.

Valdez, P., Barragan, B., Girbes, I., Shuttleworth, N., Cockburn, A., (2011). “*Use of waste from the marble industry as filler for the production of self-compacting concretes*”. *Mater.Constr* 61, 61e76.

Annexes

Tableau IV-1 : Résistances à la compression aux différents âges de durcissement (cure) et aux différents taux de substitution

Taux de substitution		0%	25%	50%	75%	100%
Age		<i>fc2</i>(MPa)	<i>fc2</i>(MPa)	<i>fc2</i>(MPa)	<i>fc2</i>(MPa)	<i>fc2</i>(MPa)
Mélanges	BSD	2,30	5,25	3,62	4,18	2,55
	BSC	11,68	13,48	10,96	9,18	2,55
Age		<i>fc7</i>(MPa)	<i>fc7</i>(MPa)	<i>fc7</i>(MPa)	<i>fc7</i>(MPa)	<i>fc7</i>(MPa)
Mélanges	BSD	7,86	11,03	8,36	8,36	10,20
	BSC	18,03	22,61	16,69	16,58	10,20
Age		<i>fc28</i>(MPa)	<i>fc28</i>(MPa)	<i>fc28</i>(MPa)	<i>fc28</i>(MPa)	<i>fc28</i>(MPa)
Mélanges	BSD	10,30	16,47	14,02	13,16	14,79
	BSC	20,07	25,09	22,68	21,55	14,79
Age		<i>fc90</i>(MPa)	<i>fc90</i>(MPa)	<i>fc90</i>(MPa)	<i>fc90</i>(MPa)	<i>fc90</i>(MPa)
Mélanges	BSD	17,79	20,71	17,95	17,14	15,66
	BSC	34,39	34,34	26,88	25,70	15,66

Tableau IV-2: Résistances à la traction par flexion aux différents âges de durcissement et aux différents taux de substitution

Taux de substitution		0%	25%	50%	75%	100%
Age		<i>ft2</i>(MPa)	<i>ft2</i>(MPa)	<i>ft2</i>(MPa)	<i>ft2</i>(MPa)	<i>ft2</i>(MPa)
Mélanges	BSD	1,71	2,01	1,86	2,38	1,53
	BSC	3,68	3,29	1,90	2,83	1,53
Age		<i>ft7</i>(MPa)	<i>ft7</i>(MPa)	<i>ft7</i>(MPa)	<i>ft7</i>(MPa)	<i>ft7</i>(MPa)
Mélanges	BSD	2,77	4,73	3,51	3,33	3,76
	BSC	5,89	5,77	3,19	4,66	3,76
Age		<i>ft28</i>(MPa)	<i>ft28</i>(MPa)	<i>ft28</i>(MPa)	<i>ft28</i>(MPa)	<i>ft28</i>(MPa)
Mélanges	BSD	4,54	5,32	4,10	5,91	4,86
	BSC	8,72	8,00	6,90	6,72	4,86
Age		<i>ft90</i>(MPa)	<i>ft90</i>(MPa)	<i>ft90</i>(MPa)	<i>ft90</i>(MPa)	<i>ft90</i>(MPa)
Mélanges	BSD	5,55	7,64	7,64	7,65	7,90
	BSC	8,95	9,02	7,34	7,30	7,90

Tableau IV-3 : La vitesse de propagation de son en fonction du taux de substitution

Taux de substitution		0%	25%	50%	75%	100%
		USV(Km/s)	USV(Km/s)	USV(Km/s)	USV(Km/s)	USV(Km/s)
Mélanges	BSD	3,66	3,67	3,29	3,52	3,53
	BSC	3,77	3,81	3,77	3,75	

Tableau IV-4 : l'indice de rebondissement en fonction du taux de substitution

Taux de substitution		0%	25%	50%	75%	100%
		Is	Is	Is	Is	Is
Mélanges	BSD	20	22	21	22	25
	BSC	27	28	26	24	
		Rc	Rc	Rc	Rc	Rc
Mélanges	BSD	9,5	11,1	8,5	10,3	12,5
	BSC	15,8	17	14,9	13,2	

Tableau V-1 : Le coefficient d'absorption par immersion NBNB15-215 :1989

Taux de substitution		0%	25 %	50 %	75%	100%
Coefficient d'absorption (%)	BSC	6,83	7,27	7,43	6,71	8,84
	BSD	6,18	8,01	7,28	7,93	8,84

Tableau V-2 : Profondeur de pénétration des chlorures dans le béton de sable en fonction de l'âge et du taux de substitution.

	0%	25%	50%	75%	100% (BSM)
Age	28jrs	28jrs	28jrs	28jrs	28jrs
BSD	7mm	9mm	13mm	12mm	11mm
BSC	5mm	6mm	8mm	7mm	
Age	56jrs	56jrs	56jrs	56jrs	56jrs
BSD	16mm	13mm	15mm	17mm	14mm
BSC	18mm	14mm	14mm	12mm	
Age	90jrs	90jrs	90jrs	90jrs	90jrs
BSD	20mm	18mm	18mm	20mm	16mm
BSC	19mm	20mm	25mm	16mm	