



HAL
open science

Formulation, microstructure, durabilité et comportement mécanique du béton à base de sable de carrière combiné au sable alluvionnaire

Emmanuel Elat Assoua Moukete

► To cite this version:

Emmanuel Elat Assoua Moukete. Formulation, microstructure, durabilité et comportement mécanique du béton à base de sable de carrière combiné au sable alluvionnaire. Génie civil. CY Cergy Paris Université; Université de Yaoundé I, 2021. Français. NNT : 2021CYUN1019 . tel-03381955

HAL Id: tel-03381955

<https://theses.hal.science/tel-03381955v1>

Submitted on 18 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT EN COTUTELLE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTEUR

de CY Cergy Paris Université, France

et

de l'Université de Yaoundé I, Cameroun

Spécialité : **Génie Civil**

Par

Emmanuel ELAT ASSOUA MOUKETE

Sujet de thèse :

FORMULATION, MICROSTRUCTURE, DURABILITE ET COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BÉTON A BASE DE SABLE DE CARRIÈRE COMBINÉ AU SABLE ALLUVIONNAIRE

Thèse soutenue le 19 Janvier 2021

Devant le jury composé de :

Président :	Karim Aït-Mokhtar	Professeur des Universités	Université de La Rochelle
Rapporteur :	Dashnor Hoxha	Professeur des Universités	Université d'Orléans
Rapporteur :	Thibaut Lecompte	Maître de Conférences HDR	Université de Bretagne Sud
Examineur :	André Lecomte	Professeur des Universités	Université de Lorraine
Invité :	Jacques Michel Njankouo	Maître de Conférences HDR	Université de Yaoundé I Ecole Polytechnique
Co-encadrant :	Alexandre Pierre	Maître de Conférences	CY Cergy Paris Université
Co-encadrant :	Prosper Pliya	Maître de Conférences	CY Cergy Paris Université
Co-directeur :	Michel Mbessa	Maître de Conférences HDR	Université de Yaoundé I
Directeur :	Albert Noumowé	Professeur des Universités	CY Cergy Paris Université

DEDICACE

A papa Edjang Njenji Guillaume Ernest...

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été mené dans le cadre d'une cotutelle au sein du Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) de CY Cergy Paris Université (France) et au sein de Laboratoire de Mécanique, Matériaux, Structures et Production (LMMPS) de l'École Nationale Supérieure Polytechnique de l'Université de Yaoundé I (Cameroun).

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse Messieurs Albert Noumowé et Michel Mbessa pour avoir accepté de diriger cette thèse. A Albert Noumowé, je dis un grand merci pour avoir rendu possible cette cotutelle. Je lui témoigne également ma reconnaissance pour avoir bataillé dur pour que je puisse avoir un financement pour mon séjour en France, sans lequel ce travail ne serait arrivé à ce stade. Son soutien incessant ses conseils ainsi que sa patience m'ont beaucoup aidé à progresser et à franchir beaucoup d'obstacles les uns après les autres. Sa disponibilité et ses encouragements constants ont rendu ce travail possible. A Michel Mbessa, je lui dois mes premiers pas dans la recherche. Ses conseils et sa rigueur m'ont été précieux pour mener à bien ce travail. Je lui dis merci pour la confiance portée en ma personne, ainsi que son soutien multiforme depuis le Master Recherche à ce jour.

Je remercie chaleureusement mes encadrants Alexandre Pierre et Prosper Pliya pour avoir accepté de m'encadrer tout au long de cette thèse. Travailler avec eux a été très enrichissant et tout a été fait dans une très grande convivialité. A Alexandre Pierre, je dis merci pour sa rigueur, sa disponibilité, ses conseils, ses observations et remarques pertinentes qui ont énormément contribué à enrichir ce travail. A Prosper Pliya qu'il soit assuré de ma reconnaissance pour ses précieux conseils. Sa disponibilité, sa patience, et l'apport de ses connaissances ont été d'une grande importance pour ce travail. Je lui dis également merci pour ses encouragements pendant les moments de stress et de doute.

Je remercie Monsieur Dashnor Hoxha, Professeur à l'Université d'Orléans et Monsieur Thibaut Lecompte, Maître de Conférences HDR à l'Université de Bretagne Sud, qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de mon travail et ont accepté de consacrer de leur temps pour la lecture et le jugement de mon mémoire de thèse. Leurs observations, remarques et suggestions lors de la lecture de mon manuscrit de thèse m'ont permis de l'apporter considérablement. Qu'il me soit également permis d'adresser mes vifs remerciements à Monsieur Karim Aït-Mokhtar, Professeur à l'Université de La Rochelle, pour avoir accepté la lourde responsabilité de présider mon jury de thèse. Ces observations et remarques m'ont permis d'améliorer ce travail. Je remercie également Monsieur André Lecomte, Professeur à l'Université de Lorraine, pour avoir examiné ce travail pendant la phase de soutenance.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude et tout le personnel du L2MGC. Ces remerciements s'adressent particulièrement à Lilian Cristofol et Annelise Cousture pour leur assistance technique pendant les phases de réalisation des essais aux L2MGC.

Mes remerciements s'adressent également à Mme Miriam Duc, Chargée de Recherche - physico-chimie et mécanique des sols au Laboratoire GERS - SRO (Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques) de l'Université Gustave Eiffel. Je lui dis merci pour son assistance technique dans la réalisation de certains essais dans son laboratoire. Ça a été également un grand plaisir de travailler avec elle dans la rédaction du papier de conférence international PhD-Symposium In Civil Engineering 2020.

Ces remerciements s'adressent également à Alexis Cothenet, Technicien supérieur au Laboratoire Granulats et Procédés d'Élaboration des Matériaux (GPEM) de l'Université Gustave Eiffel, pour m'avoir aidé à réaliser des essais Los Angeles sur mes gravillons.

Je remercie également M. Paul Ngnintedem, technicien de laboratoire à la retraite au LMMSP de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, pour sa disponibilité et son assistance dans le cadre de la réalisation des premiers essais de laboratoire.

Je remercie grandement Amel Souifi, Doctorante à CY Cergy Paris Université pour ses observations pertinentes, ses encouragements et son soutien moral pendant les moments difficiles. Je lui dis également merci pour sa disponibilité dans la relecture de ce manuscrit et des articles rédigés dans le cadre de cette thèse.

Je tiens également à remercier mes collègues doctorants avec qui j'ai passé de bons moments au laboratoire. Ces remerciements s'adressent singulièrement à Mohamadou Brahim, Abdeslam Benamar et Suzana Romagnosi, pour l'accueil chaleureux, pour la facilitation d'intégration et pour la collaboration pendant la réalisation des activités au L2MGC. Ces remerciements s'adressent également à mes collègues du LMMSP, notamment Jacques Koung et Bakaiyang Lemankreo pour la franche collaboration avec eux tout au long de ces années de thèse.

Mes remerciements s'adressent de manière particulière à ma chère et tendre épouse Suzanne Dio Ekango, pour avoir su supporter ma longue absence auprès d'elle pendant mon séjour en France. Elle a assuré le rôle de papa et celui de maman auprès de nos enfants. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, qu'elle trouve en ce mémoire la récompense de mon absence et des manquements.

Je souhaite présenter ma profonde gratitude :

- Ma chère maman, Mme veuve Moukete Lydie pour tous les efforts qu'elle ne cesse de consentir pour ma réussite ;
- Monsieur et madame Ndi, des parents formidables qui ont consacré de nombreux sacrifices pour que ce travail aboutisse à son terme ;
- Monsieur Thomas Toka, mon ancien Directeur d'entreprise, et monsieur Francis Djia, pour l'expérience acquise en travaillant à leur côté et pour les facilitations au début de cette thèse. Trouvez en ces mots ma grande reconnaissance ;

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu de prêt ou de loin tout au long de ces années de recherche.

RESUME

Le présent travail visait la recherche d'une combinaison optimale de sable de carrière et de sable de rivière dans la formulation de béton, en vue de réduire l'impact lié à l'exploitation de sable de rivière. La méthodologie adoptée dans cette thèse a consisté à faire une caractérisation physico-chimique et minéralogique des granulats de trois carrières d'un sable de rivière. Des bétons et des mortiers ont été formulés en substituant le sable de rivière par un sable concassé dans les proportions suivantes : 100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 50 % et 0 %. Des essais de caractérisation physico-mécanique et l'analyse des propriétés relatives à la durabilité ont été réalisés sur les bétons et mortiers formulés. Ces essais sur mortiers et bétons ont été complétés par une étude minéralogique et microstructurale à l'aide d'analyses par Diffraction des Rayons X (DRX), d'Analyse Thermogravimétrique (ATG) et d'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB). Les résultats ont montré que le béton confectionné avec du sable concassé présente un retrait à sec au jeune âge plus élevé que le béton de sable de rivière. Comparativement au béton de sable de rivière testé, le béton avec 50 % de sable concassé testé présente un affaissement plus faible. Il a une porosité plus faible et une résistance à la compression de 26,3 MPa à 28 jours, très proche de la résistance à la compression du béton de sable de rivière testé qui est de 26,7 MPa. De plus, il a été constaté qu'entre 28 et 90 jours, la résistance à la compression du béton testé augmente de 14,4 % et 20,6 %, respectivement pour le béton sans sable concassé (BSR0) et le béton avec 50 % de sable concassé (BSR50). Le module d'élasticité statique pour le béton de sable de rivière et le béton avec 50 % du sable concassé à 90 jours était de 23,7 et 21,8 GPa, respectivement. Les résultats ont également montré que les teneurs en ettringite, CSH et portlandite sont similaires dans les mortiers testés, tandis qu'une légère différence de carbonatation est apparue avec une carbonatation moins prononcée dans les mortiers de sable concassé. L'étude a montré que la combinaison du sable concassé avec le sable alluvionnaire permet de confectionner des bétons de propriétés satisfaisantes. Ainsi, la combinaison de sable concassé et de sable alluvial est une bonne méthode pour réduire la vitesse d'épuisement des sables alluvionnaires au Cameroun.

Mots clés : sable concassé ; sable de rivière ; mortier ; béton ; résistance mécanique ; durabilité, caractérisation microstructurale

ABSTRACT

The aim of this work was to research an optimal combination of crushed sand and river sand in the mix design of concrete in order to reduce the impact of overexploitation of river sand. The approach used in this thesis consisted of a physical, chemical and mineralogical characterization of aggregates from three quarries located in Yaoundé (Cameroon), as well as alluvial sand (from the Sanaga river). Concretes and mortars were formulated by substituting 100%, 90%, 80%, 70%, 50% and 0% of the river sand with crushed sand. The physical and mechanical characterization of the concretes and mortars were carried out, as well as tests of the properties relating to durability. These tests on mortars and concretes were completed by a mineralogical and microstructural analysis using X-Ray Diffraction (XRD) analysis, Thermogravimetric Analysis (TGA) and Scanning Electron Microscope (SEM) examinations. The results showed that the concrete made of crushed sand only has a higher drying shrinkage at a young age compared to the river sand concrete. Compared to conventional concrete (based on 100% river sand), the concrete with 50% crushed sand reduces its slump value, has a lower porosity, and has a compressive strength value of 26.3 MPa at 28 days, which is very similar to that of conventional concrete (26.7 MPa). Moreover, it was found that the strength of the concrete increased by 14.4% and 20.6%, respectively, for concrete without crushed sand (BSR0) and concrete with 50% crushed sand (BSR50) by increasing the time of hardening from 28 to 90 days. The static modulus of elasticity for conventional concrete BSR0 and BSR50 concrete with 50% crushed sand at 90 days was 23.7 GPa and 21.8 GPa, respectively. The results also showed that ettringite, CSH and portlandite contents are similar in tested mortars, while a slight difference of carbonation appeared with a lower carbonation in crushed sand mortars. The research showed that the combination of crushed sand with alluvial sand makes it possible to produce concretes with satisfactory properties. Thus, combining crushed sand with alluvial sand is a good method to reduce the depletion of alluvial sands in Cameroon. Thus, the combination of crushed sand and alluvial sand is a good method to reduce the rate of depletion of alluvial sands in Cameroon.

Keywords: crushed sand; river sand; mortar; concrete; mechanical strength; durability, microstructural characterization.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX	xvi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I.1 Introduction.....	5
I.2 Microstructure du béton.....	5
I.2.1 Les pores de la pâte de ciment.....	5
I.2.2 L'eau dans la pâte de ciment	7
I.2.3 Le silicate de calcium hydrate ou C-S-H	7
I.2.4 La portlandite	7
I.3 Durabilité des bétons.....	9
I.3.1 Les facteurs influençant la durabilité.....	9
I.3.2 Les attaques chimiques.....	10
I.3.3 Le retrait.....	11
I.3.4 La carbonatation.....	12
I.4 Généralités sur les roches	14
I.4.1 Origine des granulats	14
I.4.2 Texture des roches	15
I.4.3 Les roches de Yaoundé (Cameroun).....	16
I.5 Les granulats pour béton.....	17
I.5.1 Classification normative.....	18
I.5.2 Différents types de granulats.....	18
I.5.3 Propriétés physiques des granulats.....	19
I.5.4 Caractérisation morphométrique des granulats.....	22
I.5.5 Compacité des granulats	24

I.5.6	Empilements granulaires : Fraction volumique solide.....	24
I.6	Utilisation des granulats concassés dans les bétons et mortiers.....	26
I.6.1	Cadre réglementaire.....	26
I.6.2	Effet sur la compacité granulaire.....	27
I.6.3	Effet de la nature du granulats sur le modèle d'empilement compressible et sur la compacité granulaire.....	27
I.6.4	Effets du sable de carrière sur les bétons et les mortiers à l'état frais : demande en eau/ciment et rhéologie.....	28
I.6.5	Effets du sable de carrière sur le béton et mortier à l'état durci.....	30
I.6.6	Résistance à la traction.....	34
I.7	Conclusion.....	36
Chapitre II. MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES.....		38
II.1	Introduction.....	38
II.2	Matières premières.....	38
II.2.1	Origine et localisation des matières premières.....	38
II.2.2	Choix des carrières.....	38
II.2.3	Ciment.....	41
II.2.4	Sable alluvionnaire de référence.....	41
II.2.5	Graviers.....	42
II.3	Essais sur les matières premières.....	42
II.3.1	Obtention de poudres de granulats.....	42
II.3.2	Granulats.....	43
II.3.3	Ciment.....	48
II.4	Formulations des bétons et mortiers.....	49
II.4.1	Données de base.....	49
II.4.2	Formulations de bétons.....	49
II.4.3	Formulation des mortiers de bétons équivalents.....	51
II.5	Phase de caractérisation des matériaux cimentaires.....	52
II.5.1	Caractérisation du béton à l'état frais.....	52
II.5.2	Caractérisation du béton à l'état durci.....	53
II.5.3	Essai de détermination de la résistance à la compression et à la flexion sur mortier 57	
II.5.4	Essais de Détermination des propriétés relatives à la durabilité.....	58
II.5.5	Caractérisation microstructurale.....	62
II.6	Conclusion.....	64

Chapitre III. CARACTERISATIQUES DES MATERIAUX.....	66
III.1 Introduction.....	66
III.2 Le ciment.....	66
III.2.1 Composition chimique.....	66
III.2.2 Composition minéralogique	67
III.3 L'eau.....	68
III.4 Les roches.....	69
III.4.1 Description macroscopique.....	69
III.4.2 Caractéristiques pétrographiques	69
III.5 Propriétés des sables.....	74
III.5.1 Composition chimique.....	74
III.5.2 Composition minéralogique	76
III.5.3 Caractéristiques physiques	79
III.6 LES gravillons	85
III.6.1 Composition chimique.....	86
III.6.2 Composition minéralogique	87
III.6.3 Caractéristiques physiques	87
III.6.4 Caractéristiques mécaniques.....	89
III.7 Conclusion	89
Chapitre IV. CARACTERISATIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES MORTIERS ET BETONS.....	91
IV.1 Introduction.....	91
IV.2 Composition de bétons et mortiers.....	91
IV.2.1 Composition de bétons.....	91
VI.2.2 Compositions de mortiers de béton équivalent (MBE)	92
IV.3 Caractéristiques des bétons à l'état frais	93
IV.3.1 Affaissement au cône d'Abrams	93
IV.3.2 Etalement à la table à secousses	94
IV.3.3 Compactabilité.....	95
IV.4 PROPRIETES DES bétons à l'état durci	96
IV.4.1 Propriétés mécaniques.....	96
IV.4.2 Propriétés physiques du béton	107
IV.5 Résultats des essais sur mortiers	114
IV.5.1 Porosité et masse volumique des mortiers.....	114

IV.5.2	Résistance à la compression et à la flexion trois points.....	115
IV.5.3	Pertes de masse et retrait de séchage.....	117
IV.5.4	Détermination du coefficient de contraction hydrique	118
IV.6	Conclusion.....	120
Chapitre V. PROPRIETES RELATIVES A LA DURABILITE ET ANALYSE		
MICROSTRUCTURALE		
V.1.	Introduction.....	122
V.2	Caractérisation minéralogique	122
V.2.1	Modification de la composition minéralogique par analyse DRX.....	122
V.2.2	Analyse thermogravimétrique et analyse thermique différentielle (ATG/ATD) des mortiers 124	
V.3	Propriétés de durabilité spécifique.....	126
V.3.1	Capillarité des mortiers.....	126
V.3.2	Réaction à l'acide chlorhydrique « HCl »	128
V.3.3	Réaction au sulfate de sodium Na ₂ SO ₄	135
V.3.4	Carbonatation accélérée sur mortiers et bétons	141
V.4	Caractérisation microstructurale.....	146
V.4.1	Structure des pores et microfissuration.....	146
V.4.2	Cartographie chimique de l'analyse du silicium et du calcium.....	147
V.4.3	Modification de la microstructure du fait de la carbonatation.....	149
V.5	Conclusion	150
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		
	Conclusion générale.....	152
	Perspectives.....	153
PUBLICATIONS RELATIVES AUX TAVAUX DE THESE.....		
	Article de Journal International.....	155
	Articles de Séminaires internationaux avec Proceedings édités.....	155
REFERENCES		
ANNEXES		
	Annexe 1 : Courbes granulométriques pour compositions optimale de bétons	167
	Annexe 2 : Fiche technique ciment Dangoté.....	176

LISTE DES ABREVIATIONS

Sigle	Abréviation
Aff :	Affaissement au Cône d'Abrams
ATG/ATD :	Analyse Thermogravimétrique/Analyse Thermique Différentielle
C :	Dosage en Ciment
CIMENCAM :	Cimenteries du Cameroun
CP :	Ciment Portland
CPJ :	Ciment Portland Composé
CRPG :	Centre de Recherche Pétrographique et Géotechnique
DRX :	Diffraction à Rayons X
E :	Dosage en eau
EDS :	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
ENSP :	Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
ES :	Equivalent de Sable
GA :	Gravier Abrab Contractors
GG :	Gravier Gracam
GPa :	Giga Pascal
GR :	Gravier Razel
GRACAM :	Granulats du Cameroun
ICP-MS :	Spectrométrie de masse à plasma induit
ICP-OES :	Spectrométrie à Emission Optique à plasma induit
L2MGC :	Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil
LA :	Valeurs du coefficient de Los Angeles
LMMSPP :	Laboratoire de Mécanique, des Matériaux, de Structure et de Productique
LPA :	Lumière Polarisée Analysée
LPNA :	Lumière Polarisée Non Analysée
MBE :	Mortier de Béton Equivalent
MEB :	Microscope Electronique à Balayage
Mf :	Module de finesse
MPa :	Méga Pascal
SA :	Sable Arab Contractor
SARM :	Service d'Analyse des Roches et des Minéraux
SG :	Sable Gracam
SR :	Sable Razel
SRO :	Laboratoire Sol Roches et Ouvrages Géotechniques
SS :	Sable Sanaga
Tf :	Taux de fines

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Répartition des tailles des éléments d'une matrice cimentaire [Mehta, 1993].....	6
Figure I. 2 : Cristaux de portlandite (a) vus au microscope électronique à balayage [Damidot and Glasser, 1995] et (b) dans la matrice cimentaire d'hydrates [Regourd M. et Hornain H., 1975].....	8
Figure I. 3 : Images de quelques roches magmatiques : granite (a) ; basalte (b) [Vulliet et al., 2016].....	15
Figure I. 4 : Images de roches sédimentaires : calcaire sparitique (a) ; grès (b) [Vulliet et al., 2016].....	15
Figure I. 5 : Images de quelques roches métamorphiques : gneiss (a) ; schiste (b) [Vulliet et al., 2016].....	15
Figure I. 6 : Texture classique d'un grès [Adams et al., 1984].....	16
Figure I. 7 Texture imbriquée de roches magmatiques ou métamorphiques [Mackenzie et al., 1982].....	16
Figure I. 8 : Carte géologique schématique du Sud-Cameroun et localisation des observations. 1-3 , nappe de Yaoundé : 1 , micaschistes ; 2 , quartzites micacés ; 3 , gneiss 4 , groupe du Ntem ; A , alvéoles de paroi ; B , plis en fourreaux ; C , chevauchement ; D , linéation d'étirement (direction de transport de la nappe) ; G , grottes [Nzenti et al., 1988], [Ball et al., 1984], [Vicat et al., 2002].....	17
Figure I. 9 : Quelques granulats alluvionnaires (roulés) [A. MERDAS, 2012].....	19
Figure I. 10: Quelques granulats de carrière : graviers 5/15 (a) ; graviers 15/25 (b) ; sable 0/6 (c) ; tout venant 0/31,5 (d) [GRACAM S.A, 2018].....	19
Figure I. 11 : Les différents états de granulat avec ou sans eau [Vimane., 2001]	22
Figure I. 12 : Forme d'un granulat :.....	22
<i>Figure I. 13 : Méthode de détermination de D_{max} et D_{min} par ajustement entre une ellipse et une particule [Zoshchuk et al., 1984].....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I. 14 : Mesure de la convexité [Zoshchuk et al., 1984].....</i>	<i>23</i>
Figure I. 15 : Schéma illustrant la notion de compacité [De Larrard f., Ledran T., Brochu f., Ledee V ; 2004].....	24
<i>Figure I. 16 : Modes de compactage dans le cas d'inclusions rigides sphériques. (a) Régime semi-dilué ; (b) empilement libre aléatoire ; (c) empilement dense [Martinie et al., 2010].....</i>	<i>25</i>
Figure I. 17 : Evolution comparative de la consistance adimensionnée $\eta_{HB}(\phi) / \eta_{HB}(\mathbf{O})$ du modèle monodisperse, du modèle bidisperse, de deux sables concassés en fonction de la fraction [Ovarlez, 2011].....	26
Figure I. 18 : Compacités expérimentales des classes élémentaires en fonction de la taille des grains [De Larrard F. et al., 1999].....	27
Figure I. 19 : Effet de A (proportion de grains de tailles moitié de celle du plus gros granulat) sur la compacité, dans la courbe granulaire type de Dreux [De Larrard F. ; 2009].....	28
Figure I. 20 : Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires [De Larrard F. et al., 1999].....	28
Figure I. 21 : variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [La durabilité des bétons, 1992].....	32
Figure I. 22 : Résistance à la compression de bétons à différents taux de fillers [Sadhouari et al., 2009].	34
Figure I. 23 : Résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression [Oluokun 1991].....	35
Figure I. 24 : Comparaison de la résistance à la traction et de la résistance à la compression (élevée à la puissance 0,57), pour des bétons de résistance normale et de haute résistance.	35
Figure I. 25 : Coefficients k_t calculés pour une série de mortiers et bétons qui ont la même pâte et des granulats différents [de Larrard et Belloc 1996].....	36
Figure II. 1: Vue aérienne d'ensemble de la localisation des trois carrières A G et R [Google Earth, 2020].....	39
Figure II. 2: Vue aérienne d'ensemble de la carrière de Arab Contractor à Simbock [3°48'46"N11°26'03"E], [Google Earth, 2020].....	39

Figure II. 3 : Vue aérienne d'ensemble de la carrière Gracam à Nkolodom [3°57'49"N11°30'28"E], [Google Earth, 2020].....	40
Figure II. 4: Vue aérienne d'ensemble de la localisation de la carrière de Razel à Nkometou, [4°02'07"N11°33'59"E], [Google Earth, 2020]	41
Figure II. 5 : Images macroscopiques des sables SA, SS, SG et SR.....	41
Figure II. 6: Images macroscopiques de gravier 5/15.....	42
Figure II. 7 : Vibro-broyeur RETZCH Mill RS 200 : Emplacement du bol de broyage (a) ; Garniture en tungstène contenant un échantillon de sable réduit en poudre après broyage (b) au L2MGC	42
Figure II. 8 : Principe de biréfringence du microscope optique polarisant [DE VALONNE, 2002].....	44
Figure II. 9 : Principe ICP-OES (a) et ICP-MS (b) [Spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-OES/MS), analyse ICP, 2020]	45
Figure II. 10: vue d'ensemble du dispositif d'analyse DRX de chez Bruker AXS D8 au laboratoire SRO	46
Figure II. 11: Image de la réalisation de l'essai d'équivalent de sable au L2MGC.....	48
Figure II. 12 : Malaxeur (a), confection des éprouvettes (b), démoulage des éprouvettes (c) au LMMSP (Campagne 1).....	51
Figure II. 13 : Conservation des éprouvettes au LMMSP (a) et au L2MGC (b) (Campagne 2).....	51
Figure II. 14: Malaxeur à mortier (a) ; Table à choc (b) ; Eprouvettes de mortier (c)	52
Figure II. 15 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams au LMMSP.....	52
Figure II. 16 : Schématisation du principe de mesure de l'étalement à la table à secousses (a) [ASTM C 124,1971], mesure de l'étalement du béton à la table à secousses au LMMSP (b)	53
Figure II. 17 : Appareil d'essai de réalisation de la compression et de la traction par fendage au LMMSP	54
Figure II. 18 : Unité de pilotage de la presse et d'acquisition des données (a) ; Échantillon de béton avec des jauges de déformation lors d'un test en compression (b) eu L2MGC.....	55
Figure II. 19: Perméamètre Cembureau de mesure de la perméabilité à gaz (L2MGC).	56
Figure II. 20: Appareillage du dispositif Hot-Disk TPS 1500 au L2MGC	57
Figure II. 21: Presse 3R pour essais de compression et de flexion 3 points au L2MGC.....	58
Figure II. 22: Appareillage de mesure de la porosité à l'eau sous vide (L2MGC).....	59
Figure II. 23 : Retractomètre de mortier(a) et moule équipé de plots (b) au L2MGC	59
Figure II. 24: Présentation de l'enceinte de carbonatation accélérée au L2MGC	60
Figure II. 25: Conservation des éprouvettes (a) et opération de mesure des masses (b) au L2MGC.....	61
Figure II. 26 : Image de réalisation des essais de capillarité des échantillons de mortier.....	62
Figure II. 27 : Dispositif de microscopie électronique à balayage (MEB) au L2MGC	63
Figure II. 28 : Polisseuse sémi-automatique (a) et échantillons imprégnés de résine et polis (b) échantillons métallisé (c) au L2MGC.....	63
Figure II. 29: Appareil ATG/ DSC NETZSCH STA 449 F1 Jupiter au L2MGC	64
Figure III. 1 : Microstructure de la poudre de ciment : a) image MEB b). Spectres EDS.....	67
Figure III. 2: Diffractogramme du ciment Dangoté.....	68
Figure III. 3: Images des échantillons de roches extraites des carrières ; a) Carrière Razel ; b) Carrière Arab Contractor ; c) ensemble de roches utilisées pour préparation des lames minces	69
Figure III. 4 : Observation de la lame mince de la roche de la carrière Arab Contractor.....	70
Figure III. 5 : Observation de la lame mince de la roche de la carrière Gracam	71
Figure III. 6 : Observation de la lame mince de la roche de la carrière Gracam	72
Figure III. 7 : Estimation des proportions des minéraux obtenue par observation en lame mince	73
Figure III. 8 : Images MEB et spectres EDS des sables SA, SG, SR et SS	75
Figure III. 9 : Comparaison des proportions des composés chimiques présents dans les sables concassés, par rapport à celles du sable de rivière.	76
Figure III. 10 : Diagrammes diffractogrammes des différents sables SA, SG, SR et SR.....	78

Figure III. 11 : Courbes granulométriques fuseaux des mélanges de sables.	81
Figure III. 12 : Rapport du taux de fines sable concassé/taux de fines sable rivière (a) ; rapport module de finesse sable concassé/module de finesse sable rivière (b)	82
Figure III. 13 : Rapport de l'équivalent de sable des sables concassés sur celui du sable de rivière.....	83
Figure III. 14 : Compacité du sable concassé en fonction de celle du sable de rivière	83
Figure III. 15 : Valeurs de rapport des coefficients d'absorption des sables concassés par rapport à celui du sable de rivière	84
Figure III. 16 : comparaison des densités apparente et absolue des sables concassés par rapport au sable de rivière.	85
Figure III. 17 : Images MEB et spectres EDS des graviers GA, GG, GR	86
Figure III. 18 : Rapport de proportions des composés contenus dans le sable et dans les graviers de la même carrière.....	87
Figure III. 19 : Courbes granulométriques des graviers issus des trois carrières : GR, GA, GG.....	88
Figure IV. 1 : Évolution de l'affaissement en fonction de la proportion de sable de carrière.....	93
Figure IV. 2 : Variation de la compacité en fonction de la proportion de sable de concassage.....	95
Figure IV. 3 : variation de la compacité en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.....	96
Figure IV. 4 : Résistances à la compression des bétons.....	98
Figure IV. 5 : Evolution de la résistance à la compression des carrières Arab Contractor (a), Gracam (b) et Razel (c).....	99
Figure IV. 6 : Valeurs de la résistance à la traction par fendage des bétons.....	102
Figure IV. 7 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des bétons avec mélanges de sables Arab Contractor (a), Gracam (b) et Razel (c).....	103
Figure IV. 8 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les bétons de granulats de la carrière Arab Contractor.....	104
Figure IV. 9 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les bétons de granulats de la carrière Gracam.....	104
Figure IV. 10 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les bétons de granulats de la carrière Razel.....	104
Figure IV. 11 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du déplacement	106
Figure IV. 12 : Courbes contraintes-déformations des bétons.....	107
Figure IV. 13: Evolution du retrait de séchage des bétons étudiés.....	108
Figure IV. 14 : Evolution de la masse volumique et de la porosité accessible à l'eau des différentes formulations	109
Figure IV. 15 : Valeurs de la conductivité thermiques des bétons	111
Figure IV. 16 : Perméabilité intrinsèque et porosité accessible à l'eau des bétons étudiés.....	112
Figure IV. 17 : Faciès de rupture de béton de BSR100 (a) ; BSR0 (b).....	113
Figure IV. 18 : Présentation des modes de rupture des bétons BSG0 (a) ; BSG50 (b) ; BSR0 (c) ; et BSR50 (d).	113
Figure IV. 19: Evolution de la porosité en fonction des compositions de mortier.....	115
Figure IV. 20 : Corrélation entre résistance à la compression et résistance à la flexion	116
Figure IV. 21. Evolution de la perte de masse des différents mortiers.....	117
Figure IV. 22 : Retrait de séchage des différents mortiers	117
Figure IV. 23 : Variations du retrait de séchage en fonction de la perte de masse des différents mortiers	120
Figure V. 1: Diagrammes de DRX de sable SS et de mortiers de sable mélangé MSR0 et MSR50	122
Figure V. 2 : Diagramme de DRX des mortiers de sable SR et de sable mélangé MSR100 et MSR50...	123

Figure V. 3 : Courbes ATG et ATD du mortier MSS100	124
Figure V. 4 : Courbes ATG et ATD du mortier MSR100.....	125
Figure V. 5: Evolution du coefficient d'absorption capillaire des mortiers en fonction du temps.	126
Figure V. 6 : Valeurs du coefficient de capillarité relative à celle du mortier MSS100.....	127
Figure V. 7: Variation de masse des mortiers MSS100, MSA50 et MSA100 (a) ; MSS100, MSG50 et MSG100 (b) ; MSS100, MSR50 et MSR100 (c) en solution de HCl.....	129
Figure V. 8 : Fuseau des variations de masse des différents mortiers conservés dans des solutions de HCl	130
Figure V. 9 : Perte de masse relative à celle du mortier MSS100	131
Figure V. 10 : Résistances à la compression et à la flexion des échantillons de mortiers en solution de 0,5 % de HCl et dans de l'eau	133
Figure V. 11 : Pertes de résistance à la compression (a) et à la flexion (b) des mortiers après attaque de HCl, relativement aux caractéristiques du mortier MSS100.....	134
Figure V. 12 : Images de dégradation des échantillons de mortiers après immersion de 259 jours dans une solution de HCl.....	135
Figure V. 13 : Variation de masse de mortier MSS100, MSA50 et MSA100 (a) ; MSS100, MSA50 et MSA100 ; (b) ; MSS100, MSR50 et MSR100 (c) en solution de Na ₂ SO ₄	136
Figure V. 14 : Fuseau des variations de masse des différents mortiers en solution de Na ₂ SO ₄	137
Figure V. 15 : Perte de masse des mortiers après attaque de Na ₂ SO ₄ relativement au mortier MSS100	137
Figure V. 16 : Résistances à la compression et à la flexion des échantillons de mortiers en solution de 0,5% de Na ₂ SO ₄ et dans de l'eau.	139
Figure V. 17 : Pertes de résistance à la compression (a) et à la flexion (b), des mortiers relativement à caractéristiques mécaniques du mortiers MSS100 après attaque de Na ₂ SO ₄	140
Figure V. 18: Images de dégradation des échantillons de mortiers après immersion dans la solution de Na ₂ SO ₄	141
Figure V. 19 : Profondeur de carbonatation après la pulvérisation de la phénolphtaléine.....	143
Figure V. 20 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la durée de carbonatation..	144
Figure V. 21 : Comparaison des valeurs de porosité accessible à l'eau des mortiers avant et après carbonatation	145
Figure V. 22 : Topographie MEB des surfaces polies de mortiers MSS100 (a) ; MSR50 (b) et MSR100 (c) MSR100.....	146
Figure V. 23 : Cartographie du silicium (Si) et du calcium (Ca) sur les pâtes de mortier MSR100(a) (Si : bleu, Ca : rose), MSR50 (b) (Si : bleu, Ca : rose), (MSR0 c) (Ca : bleu, Si : orange), (d) spectres EDX sur les mortiers.....	148
Figure V. 24 : Images MEB de mortier MSS100, MSR50 et MSR100 avant et après carbonatation.....	149
Figure Annexe 1 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 100% SA+0%SS.....	167
Figure Annexe 2 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 90% SA+10% SS	167
Figure Annexe 3 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 80% SA +20% SS	168
Figure Annexe 4: Distribution granulaire pour composition de bétons de 70% SA + 30% SS	168
Figure Annexe 5: Distribution granulaire pour composition de bétons de 50% SA +50% SS	169
Figure Annexe 6: Distribution granulaire pour composition de bétons de 0% SA + 100% SS	169
Figure Annexe 7 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 100% SG + 0% SS.....	170
Figure Annexe 8 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 90% SG + 10% SS.....	170
Figure Annexe 9: Distribution granulaire pour composition de bétons de 80% SG + 20% SS	171
Figure Annexe 10: Distribution granulaire pour composition de bétons de 70% SG + 30% SS	171
Figure Annexe 11 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 50% SG + 50% SS	172
Figure Annexe 12 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 0% SG + 100% SS	172

Figure Annexe 13 : Distribution granulair pour composition de bétons de 100% SR + 0% SS	173
Figure Annexe 14 : Distribution granulair pour composition de bétons de 90% SR + 10% SS	173
Figure Annexe 15 : Distribution granulair pour composition de bétons de 80% SR + 20% SS	174
Figure Annexe 16 : Distribution granulair pour composition de bétons de 70% SR + 30% SS	174
Figure Annexe 17 : Distribution granulair pour composition de bétons de 50% SR + 50% SS	175
Figure Annexe 18 : Distribution granulair pour composition de bétons de 100% SR + 0% SS	175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : Classification des pores en fonction de leurs dimensions et de leurs influences sur les propriétés du béton durci [Silva et al., 2001]	6
Tableau III. 1 : Composition chimique du ciment (%).....	66
Tableau III. 2 : Composition minéralogique (Fiche technique)	67
Tableau III. 3 : Estimation des proportions des différentes phases présentes dans le ciment	68
Tableau III. 4 : Estimation des proportions des phases minérales présentes dans un échantillon de roche de la carrière Arab Contractor	70
Tableau III. 5 : Estimation des proportions des phases minérales présentes dans un échantillon de roche de la carrière Gracam.....	71
Tableau III. 6 : Estimation des proportions des phases minérales présentes dans un échantillon de roche de la carrière Razel.....	73
Tableau III. 7 : Composition chimique des sables.....	74
Tableau III. 8 : Estimation des proportions des différentes phases présentes dans les sables	79
Tableau III. 9 : Teneur en fines et module de finesse des sables	82
Tableau III. 10 : Equivalent de sable des sables utilisés	82
Tableau III. 11 : Coefficient de compacité des sables étudiés.....	83
Tableau III. 12: Absorption d'eau des sables	84
Tableau III. 13 : Masses volumiques et densités absolues et apparentes des sables.....	85
Tableau III. 14 : Composition chimique des graviers.....	86
Tableau III. 15 : Analyse granulométrique par tamisage (% de passant) des gravillons.....	88
Tableau III. 16 : Masse volumique et densités absolue et apparente des gravillons.....	88
Tableau III. 17 : Coefficient Los Angeles des graviers	89
Tableau IV. 1 : Compositions des bétons (pour 1 m ³ de béton).....	92
Tableau IV. 2 : Compositions de mortiers	93
Tableau IV. 3 : Etalement des bétons au tronc de cône	94
Tableau IV. 4 : Valeurs (en MPa) de la résistance à la compression des bétons à 7, 21 et 28 jours.....	97
Tableau IV. 5 : Valeurs de résistance à la traction par fendage des différents bétons étudiés.....	101
Tableau IV. 6 : Valeurs de la résistance à la compression des bétons	106
Tableau IV. 7 : Valeurs du module d'élasticité linéaire des bétons.....	107
Tableau IV. 8 : Valeurs de Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente des différents bétons	109
Tableau IV. 9 : Caractéristiques thermiques des bétons	110
Tableau IV. 10 : Valeurs de perméabilité intrinsèque.....	112
Tableau IV. 11: Valeurs de porosité accessible à l'eau obtenues sur les échantillons de mortier	114
Tableau IV. 12: Valeurs de la résistance à la compression et à la flexion trois points.....	116
Tableau IV. 13 : Valeurs du coefficient de contraction hydrique des différents mortiers.....	120
Tableau V. 1 : Valeurs du coefficient d'absorption par capillarité des mortiers.....	127
Tableau V. 2 : valeurs de perte de masse des mortiers exposés à une attaque d'acide chlorhydrique	130
Tableau V. 3 : Résistance à la compression et à la flexion des mortiers exposés à 0,5 % de HCl et conservés dans de l'eau pendant 259 jours.	132
Tableau V. 4 : Pertes de performances mécaniques après attaque de HCl.....	133
Tableau V. 5 : valeurs de perte de masse des mortiers exposés à une attaque de Na ₂ SO ₄	137

Tableau V. 6 : Résistances à la compression et à la flexion des mortiers exposés à 5 % de Na_2SO_4 et à l'eau pendant 259 jours.	138
Tableau V. 7 : Pertes de performances mécaniques après attaque de Na_2SO_4	139
Tableau V. 8 : Valeurs de la profondeur de carbonatation des différents mortiers.....	144
Tableau V. 9 : Variation des valeurs de porosité avant et après carbonatation.....	145

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un mélange, dans des proportions bien définies, de granulats (sable et gravier), de liant hydraulique (le plus souvent du ciment), d'eau et éventuellement d'adjuvants. C'est le matériau de construction le plus utilisé dans le domaine des bâtiments et des ouvrages d'art. Trois quarts des bâtiments et ouvrages du génie civil sont réalisés en béton et plus de six milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Les granulats sont utilisés actuellement à hauteur de 70 à 80 % en volume dans la composition du béton et représentent désormais une ressource non renouvelable et dont l'accessibilité diminue [Hafid, 2012].

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Deux types de sable sont généralement utilisés dont les sables alluvionnaires, provenant d'une rivière et les sables concassés, provenant de carrières. Le sable couramment utilisé pour la confection du béton est le sable de rivière. Le Cameroun est engagé ces dernières années dans la réalisation de projets structurants, et aussi avec l'organisation de la Coupe d'Afrique des Nations de football 2022. On observe ainsi la réalisation de nombreux bâtiments et infrastructures sportives, routières et hôtelières dans certaines villes du Cameroun et principalement à Yaoundé (capitale politique du Cameroun). La mise en œuvre de tous ces projets a créé un "boom" de la demande en matériaux de construction, particulièrement les granulats. Cette situation a provoqué une surexploitation du sable de rivière.

La demande sans cesse croissante de ce sable a provoqué sa rareté, une augmentation du prix d'achat, et aussi un préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions sur les ressources naturelles et l'érosion des berges. De plus, certains sables de rivière sont pauvres en particules fines, nécessaires à la réduction de la porosité du béton et permettant de mieux assurer une continuité granulaire entre le ciment et le gravier [Zeghichi et al., 2014]. Il est donc recommandé d'utiliser un sable dont la granulométrie est étalée et la continuité des diamètres des grains bien répartie pour la fabrication de béton [Koffi et al., 2008]. C'est la raison pour laquelle dans les laboratoires et chantiers de Bâtiments et Travaux Publics (BTP) au Cameroun, la formulation des bétons est presque toujours réalisée avec du ciment, de l'eau, du gravier, du sable grossier et de sable fin.

Pour répondre à cette demande importante en granulats, on observe un développement des sites d'exploitation des carrières de granulats. L'augmentation de ses sites de production des granulats a été favorisée par la topographie de la ville de Yaoundé, qui est composée de plusieurs montagnes rocheuses et collines. On y retrouve actuellement plus de onze sites d'exploitation de carrières à granulats. Trois d'entre eux ont été identifiés et choisis dans le cadre de cette thèse pour la provenance des granulats. Le

sable de carrière y est produit massivement et utilisé dans les chantiers comme alternative au sable de rivière. Cependant, très peu de recommandations scientifiques sont disponibles pour l'utilisation du sable concassé au Cameroun. Les formulations sont principalement basées sur des méthodes empiriques, à base des bétons de convenance. Il se pose ainsi la problématique de l'impact de ce sable sur les propriétés des bétons et mortiers ainsi mis en œuvre.

L'objectif général de ce travail de recherche est d'étudier l'influence du sable de carrière sur les propriétés mécaniques, sur la microstructure et sur la durabilité du béton et mortier, en vue de proposer un modèle de formulation optimale, combinant sable de carrière et sable de rivière et de réduire l'impact lié à la surexploitation du sable de rivière.

De manière spécifique, il est question de déterminer dans un premier temps les performances mécaniques du béton à base de sable de carrière et de les comparer à ceux confectionnés à base de sable de rivière. Dans un second temps, et au-delà de cette question de caractéristiques mécaniques, il est également envisagé d'évaluer la résistance de ces bétons au phénomène de carbonatation et de l'attaque aux acides et aux sulfates. En effet, du fait de la densité de sa population, et de l'installation de plusieurs entreprises industrielles, et de la taux considérablement élevé du transport individuel, le taux d'émission du CO₂ émis dans la ville de Yaoundé est assez important. Cette situation est susceptible de provoquer des phénomènes de carbonatation du béton des infrastructures de cette localité. Aussi, bon nombre de systèmes d'épuration des eaux de toilettes (eaux usées et eaux vannes) sont mal dimensionnés et ne fonctionnent pas correctement, affectant ainsi les eaux souterraines et exposant les ouvrages de cette localité à des risques d'attaque aux acides et sulfates.

De ce fait, la question d'analyse comparative de la résistance des ouvrages réalisés avec du sable de rivière et du sable de carrière face à ces agents agressifs est posée.

Le présent travail de recherche s'inscrit donc dans le cadre de la valorisation du sable concassé de Yaoundé, et la résolution du problème de surexploitation du sable de rivière dans la fabrication de béton et mortier, en proposant une formulation de béton durable. Trois campagnes de formulations ont été réalisées dans cette thèse. La première campagne, réalisée au Laboratoire au LMMSPP concernait la formulation de bétons obtenus en substituant le sable de rivière par un sable concassé dans les proportions de 100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 50 % et 0 %, et en utilisant les granulats des trois carrières, ainsi que le sable de rivière. Au cours de cette campagne, des essais d'affaissement au cône d'Abrams, de compactibilité et d'étalement du béton à l'état frais ont été réalisés. Les essais de retrait de séchage, de résistance à la compression et à la traction par fendage ont par la suite été réalisés sur béton durci.

Une deuxième campagne de formulation a été réalisée cette fois-ci au L2MGC, sur des matériaux venant de Yaoundé, et en se limitant aux formulations correspondants aux

mélanges à 0% de sable de carrière et 100% de sable de rivière et ceux correspondants à 50% de mélanges des deux sables.

Pour réduire les essais à réaliser sur le béton, des mortiers ont été formulés en remplaçant, dans la matrice de formulation des bétons le squelette granulaire des gravillons par le sable. Ces mortiers ont été formulés sur la base des mélanges correspondant à la substitution du sable de rivière par le sable de carrière dans les proportions de 100%, 50% et 0%. Ces formulations constituent la troisième campagne. Elle aussi a été réalisée au L2MGC. Les essais mécaniques, minéralogiques, microstructuraux et de durabilité ont été réalisés sur les éprouvettes de mortiers confectionnés. Il s'agit notamment des essais de résistance à la compression et à la flexion

De porosité, de carbonatation accélérée d'attaque chimique à l'acide chlorhydrique et au sulfate de sodium. Ces essais ont été complétés par une analyse thermogravimétrique (ATG) et diffractométrie au rayon X (DRX). Une observation MEB a également été réalisée sur les échantillons de mortiers formulés.

Pour toutes les formulations, une seule classe granulaire de gravillons a été utilisée (la classe 5/15), pour mieux apprécier l'influence du sable sur les propriétés du béton. Tous les mélanges ont été préparés en utilisant du ciment Portland ordinaire, CEM II 42,5, avec un rapport eau/ciment (E/C) égale à 0,6 pour un dosage en ciment de 350 Kg/m³. La classe de consistance retenue est la classe S2 et la classe de résistance C25/30, pour une résistance caractéristique à la compression à 28 jours de 25 MPa.

Le mémoire est organisé et structuré en cinq chapitres, présentés ainsi qu'il suit :

Le premier chapitre est dédié à l'étude bibliographique. Ce chapitre présente les généralités sur la microstructure du béton, ainsi que les généralités sur les granulats, leur origine ainsi que leur nature. Un accent est mis sur l'analyse des paramètres morphologiques des granulats et leur influence sur le béton et mortier. Une synthèse de l'état de l'art sur l'utilisation du sable concassé dans les bétons et mortiers et son influence sur les propriétés du béton a également été présentée.

Le deuxième chapitre concerne la présentation du choix des matériaux et des procédures expérimentales. Un accent est mis sur le contexte de l'étude et sur les critères de choix de la zone de provenance des matériaux. Les procédures d'essais, les normes et les matériels utilisés pour la réalisation des essais sont présentés. Les équipements utilisés pour la réalisation des essais ont également été présentés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de la caractérisation des matériaux de base (les granulats et le ciment utilisés). L'approche expérimentale exposée dans ce chapitre a pour objectif la mise en évidence des propriétés des sables de concassage et du sable de rivière. Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de la composition chimique des granulats réalisée par fluorescence X, suivie d'une analyse minéralogique par DRX. S'en est suivie la présentation des propriétés physiques des granulats. Les résultats d'analyse granulométrique, les mesures de masse volumique et de densité, ainsi que les caractéristiques telles que l'équivalent de sable, le module de

finesse, le taux de fin ainsi que le coefficient Los Angeles des granulats sont également présenté. L'examen microstructural au MEB, utilisant le mode de rétrodiffusion des électrons et couplé d'une EDS, sur des échantillons broyés a été réalisé pour compléter la caractérisation de matériaux physico-chimique et mécanique des granulats. Une analyse comparative est faite entre les caractéristiques des sables concassés et entre ces caractéristiques et celles du sable de rivière.

Le quatrième chapitre l'un des principaux de notre travail, est confiné à la présentation des propriétés physiques et mécaniques des mortiers formulés. Le plan choisi pour ce chapitre est la présentation des différentes compositions de mortiers et bétons, suivie par la présentation des propriétés rhéologiques du béton. Il s'en est suivi la présentation des propriétés physiques et mécaniques des bétons et mortier. Les tests réalisés à l'état frais concernent l'affaissement au cône d'Abrams, l'étalement à la table à secousses, la compactibilité du béton et la masse volumique. Ceux réalisés sur le béton et mortier à l'état durci sont la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité statique et dynamique, la masse volumique, la porosité accessible à l'eau, le retrait et la conductivité thermique. Enfin, les résultats des essais de caractérisation des mortiers seront présentés (masses volumiques, résistances à la compression et à la flexion, retrait et perte de masse, porosité accessible à l'eau). Chaque résultat présenté est suivi d'une interprétation et de discussions en rapport avec les résultats de la littérature.

Le cinquième chapitre, et le dernier de ce mémoire, est consacré à l'analyse des indicateurs spécifiques de durabilité suite aux essais de carbonatation accélérée, d'attaques chimiques à l'acide chlorhydrique et au sulfate de sodium des mortiers à base de sables de concassage et de sable de rivière. Cette analyse sera complétée par une caractérisation microstructurale à l'aide d'examen DRX, ATG et MEB. Pour toutes les formulations, une étude de l'influence de l'attaque chimique sera faite sur la résistance à la compression et à la flexion sur éprouvettes de mortier. Il s'en est suivi une étude de la dégradation et de perte de masse. Dans ce chapitre un accent a été mis sur l'étude de l'influence de la carbonatation sur la porosité des bétons.

I.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau composite et hétérogène, dont la qualité et les performances dépendent des matières premières qui entrent dans sa composition. Le sable est l'un de ces principaux constituants. Son utilisation permet de réduire la structure poreuse du béton et d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre les graviers et le ciment pour une meilleure densité et cohésion du béton [Zeghichi et al., 2014]. Cette dernière décennie a été marquée par une augmentation considérable de la consommation mondiale du sable [Hafid, 2012]. Cette situation a causé la hausse du prix du sable de rivière, ainsi que sa rareté. L'une des solutions alternatives à ce problème est l'utilisation des sables concassés de carrière dans la formulation des bétons et mortiers [Khouadjia, 2016].

Ce premier chapitre propose un état de l'art des principaux travaux concernant l'utilisation du sable de carrière dans la fabrication du béton et mortier. L'objectif est d'améliorer les connaissances sur les effets de ces granulats sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état frais et durci. Dans un premier temps, nous présentons les généralités sur la microstructure et la durabilité du béton. Par la suite, nous présentons des généralités sur les roches. Nous nous focalisons principalement sur les roches de la ville de Yaoundé (Cameroun) et nous rappelons également le cadre réglementaire. Nous terminerons par la présentation d'une synthèse des principaux travaux sur l'étude de l'influence des sables de concassage sur les propriétés du béton.

I.2 MICROSTRUCTURE DU BETON

Le béton est un matériau composite, hétérogène et poreux, composé de (en volume) : ciment (7 à 14%), granulats « sables et graviers » (entre 60 et 78%), eau (14 à 22%), air (1 à 6%) et éventuellement des additions minérales et des adjuvants (moins de 5% de la masse du ciment). Ces constituants confèrent au béton sa consistance à l'état frais et lui permettent d'acquérir à l'état durci les caractéristiques physico-chimiques recherchées [Chanvillard and D'aloia, 1994]. L'analyse de la microstructure du béton est une activité complexe et dépend entre autres des matériaux qui le composent, des conditions de mise en œuvre et de son comportement mécanique lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques et chimiques) [Makani, 2011].

I.2.1 Les pores de la pâte de ciment

La pâte est le constituant le plus complexe. Elle forme ce que l'on appelle la matrice cimentaire du matériau [Marouf, 2019]. La porosité de la pâte de ciment est un paramètre important car elle conditionne toutes les propriétés du béton comme la résistance en compression et les indicateurs de durabilité [Baron et Ollivier, 1992]. Cette porosité varie d'un béton à un autre de façon significative, à la fois quantitative de moins de 10 % pour

les bétons à très hautes performances (BTHP) à plus de 15% pour les bétons ordinaires (BO), et aussi qualitative (dimensions et répartitions des rayons de pores). La connaissance de la taille des pores est tout aussi essentielle. En effet, on considère deux catégories distinctes de pores :

- Les pores capillaires dont le diamètre est supérieur à 0,02 μm . Il semble que les différences structurales entre des pâtes de ciment, de type ou de rapports E/C variés, proviennent essentiellement des différences entre les porosités capillaires [Hansen, 1986; Baroghel-Bouny, 1994] ;
- Les micropores ou pores de gel dont le diamètre est inférieur à 0,02 μm et qui sont une caractéristique intrinsèque de l'hydrate. Cette microporosité, au contraire de la précédente, dépend faiblement du rapport E/C et est essentiellement due aux C-S-H [Hansen, 1986]. La figure I.1 montre une représentation schématique fournie par [Mehta, 1986] des différentes phases solides et poreuses présentes au sein de la matrice cimentaire.

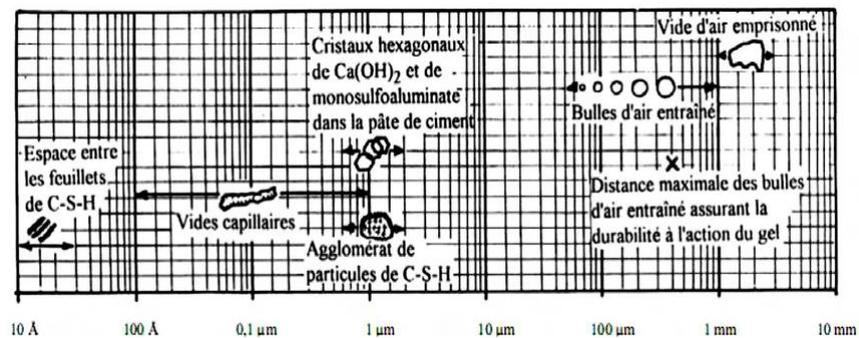


Figure I. 1: Répartition des tailles des éléments d'une matrice cimentaire [Mehta, 1993]

Les différents pores rencontrés dans les pâtes de ciment durcies, classés en fonction de leur dimension et des propriétés qu'ils affectent, sont rassemblés dans le tableau I.1.

Tableau I. 1 : Classification des pores en fonction de leurs dimensions et de leurs influences sur les propriétés du béton durci [Silva et al., 2001]

Désignation	Diamètres	Description	Propriétés affectées
Pores du gel	< 0,5 nm	Espaces inter-couches	Retrait et fluage
	0,5-2,5 nm	Micropores	Retrait et fluage
	2,5-10 nm	Mésopores	Retrait
Pores capillaires	10-50 nm	Capillaires moyens	Résistance, perméabilité, retrait
	50 nm-1 μm	Larges capillaires	Résistance, perméabilité
	> 1 μm	Larges capillaires et poches d'air	Résistance

I.2.2 L'eau dans la pâte de ciment

L'eau est un des constituants de base du béton. Elle est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée. Les différentes catégories sont présentées ci-dessous.

[Baron et Sauterey, 1982 ; Guénot-Delahaie, 1997] décrivent les différents types d'eau évaporables selon la force de la liaison :

- L'eau libre et capillaire : elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimensions supérieures à 10 μm (gros pores et fissures) [Makani, 2011];
- L'eau adsorbée : l'eau est adsorbée sur les parois des surfaces externes des particules. Cette eau peut s'adsorber physiquement : les forces d'attraction sont de type Van-der-Waals. L'eau est énergétiquement liée et confinée dans les pores de très petites tailles entre les surfaces des cristaux. Elle peut également s'adsorber chimiquement, des électrons sont mis en commun entre l'eau et la surface solide. Ainsi, la structure de la molécule d'eau est modifiée (dissociation par rupture de la liaison covalente O-H) [Makani, 2011].

I.2.3 Le silicate de calcium hydrate ou C-S-H

Le silicate de calcium hydraté est le principal constituant de la pâte de ciment durci. Il existe plusieurs variétés de silicates de calcium hydratés, qui diffèrent de par leur structure, appelées C-S-H (de composition $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)(\text{H}_2\text{O})_y$ où les valeurs de x et y dépendent de la teneur en calcium et en silicates dans la phase aqueuse [Viallis-Terrisse, 2000]). Les C-S-H présentent une grande surface spécifique et une porosité d'environ 28% [Powers, 1968]. Les surfaces des C-S-H sont très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment [Guenot-Delahaie, 1997].

I.2.4 La portlandite

La portlandite ou l'hydroxyde de calcium est un composé cristallin de forme hexagonale (figure I.2a) et de formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$, noté CH [Damidot and Glasser, 1995]. La portlandite se forme par précipitation, en solution, dans l'espace poreux de la pâte de ciment [Bajja, 2016]. Au cours de l'hydratation, les cristaux de portlandite croient, rejoignent les grains de ciment recouverts de gel de C-S-H, et forment ainsi des ponts d'hydrates, facilitant la percolation des phases solides à court terme (figure I.2b). Cette phase se trouve préférentiellement dans les zones poreuses où elle peut disposer de suffisamment d'espace pour cristalliser. Baroghel-Bouny dans [Véronique Baroghel-Bouny, 1994] met en évidence l'existence de CH dans les bulles d'air et les pores de la

pâte de ciment, mais également à l'interface granulat/pâte pour les mortiers et bétons. La portlandite contribue ainsi à réduire le volume total des pores en transformant une partie de l'eau liquide sous forme de cristaux solides très peu poreux [Hewlett, 2003; Taylor, 1997].

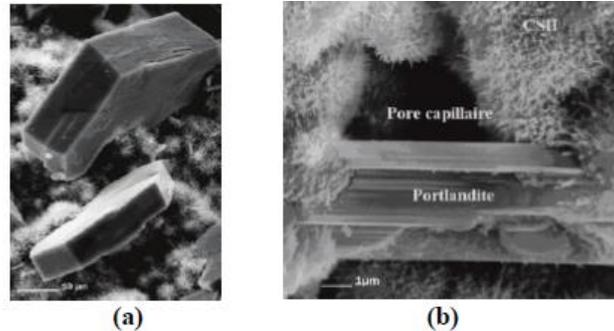


Figure I. 2 : Cristaux de portlandite (a) vus au microscope électronique à balayage [Damidot and Glasser, 1995] et (b) dans la matrice cimentaire d'hydrates [Regourd M. et Hornain H., 1975]

En plus de sa propriété de précipitation dans la porosité de la pâte, la portlandite est la phase la plus soluble parmi tous les hydrates (solubilité de l'ordre de 2,16 mol/L à 25°C). Elle se dissout et contribue avec les alcalins (Na_2O et K_2O), à la basicité de la solution interstitielle, indispensable pour la passivation des armatures métalliques du béton armé [Damidot and Glasser, 1995]. L'équilibre chimique de la portlandite dans un milieu cimentaire sans présence d'alcalins s'établit à un pH très basique, de l'ordre de 12,4. Ainsi, en cas d'exposition de la pâte à de l'eau pure par exemple, et de par sa grande solubilité, la portlandite se dissout pour compenser le départ des ions calcium par lixiviation. Cette décomposition augmente la porosité du matériau et par conséquent sa vulnérabilité vis-à-vis des agressions extérieures [Adenot, 1992].

1.2.5. Microstructure de l'interface pâte-granulats

Au cours de l'hydratation du béton, des liaisons s'établissent entre la pâte de ciment et les granulats. Cela se traduit par une zone particulière appelée interface pâte/granulats [Maso, 1980].

Selon les études menées par Gaweska et al., [Gaweska Hager, 2004] la nature des granulats influence la qualité de la zone de transition. La même étude a montré que les granulats calcaires (réactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion. Cela a été expliqué par le fait que la réaction entre le CaCO_3 provenant des granulats calcaires et les aluminates tricalciques et les alumino-ferrites tétracalciques engendrent une formation de monocarbo - aluminates de calcium ($[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}]_2 \text{CO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$). L'étude de Malier [Malier, 1992] quant à elle a montré que qu'il y a une augmentation de la résistance du béton obtenue avec les granulats de cette nature contrairement aux granulats de type quartz (comme les granulats siliceux) qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment. Dans le cadre de notre thèse, nous analyserons

cette zone transition des bétons avec nos sables de carrières, comparativement au sable de rivière.

I.3 DURABILITE DES BETONS

La durabilité du béton peut être définie comme étant la résistance du béton aux agressions physiques et mécaniques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévues pour l'ouvrage [Ferhati, 2016]. De ce fait, plusieurs paramètres extérieurs et intérieurs à la structure du béton peuvent influencer la durabilité des ouvrages. Dans cette section, nous insisterons sur les principaux paramètres liés aux matériaux utilisés dans le cadre de cette thèse, ainsi que sur les sur les types d'attaques auxquelles les ouvrages peuvent être exposés.

I.3.1 Les facteurs influençant la durabilité

De manière générale, la durabilité dépend des paramètres de composition en terme de compacité, de nature chimique du liant et de la minéralogie des granulats [Zaamouki, 2016]. La perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités mécaniques et protectrices (à l'égard de la corrosion des armatures principalement) [Gonzalez et al., 1980]. Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste en une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ses propriétés physico-chimiques et mécaniques [Aitcin, 2003]. De ce fait, d'une part, cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (par perméabilité ou par diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates principalement de la portlandite. D'autre part, cela induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. Cela a été expliqué par le fait que les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique [Rozière, 2007].

Les réactions chimiques internes mettent en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton [Baroghel-Bouny et al., 2002]. Au Cameroun en général, et à Yaoundé en particulier, la plupart des systèmes d'épuration des eaux usées et eaux vannes ne fonctionnent pas correctement. Les études de Youmbi et al., [Youmbi et al., 2013], sur la pollution de l'eau souterraine et risques sanitaires à Yaoundé au Cameroun ont permis de montrer que la pollution des eaux souterraines se fait dans les quartiers spontanés, à travers une contamination horizontale par les fèces stockées dans les latrines à fond perdu. La même étude a montré que la plupart des latrines anciennes ou neuves, en service ou non, constituent toutes des sources de pollution diffuse très importantes. Cette situation est susceptible de provoquer une contamination des eaux souterraines et d'attaquer les ouvrages en béton.

Les travaux de Matchebou et al, [Matchebou et al., 2009] sur l'étude de l'impact du parc automobile sur la congestion du trafic et la pollution de l'air dans la ville de Yaoundé ont permis d'observer que la ville de Yaoundé souffre d'une insuffisance du réseau routier doublée d'une généralisation du système de transport individuel, ce qui provoque des bouchons réguliers rendant difficile la mobilité urbaine et avec une conséquence importante sur l'émission de CO₂ qui est en nette augmentation dans la ville. L'étude a permis de constater que la quantité de CO₂ émise en 2020 est de l'ordre de 7 millions de tonnes, exposant ainsi les ouvrages à une attaque de carbonation.

Par contre, très peu d'études (notamment d'alcali réaction) sont réalisées sur les granulats utilisés dans la fabrication de béton au Cameroun.

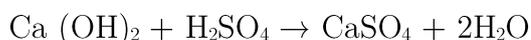
I.3.2 Les attaques chimiques

Au cours de leur mise en service, les ouvrages en béton sont exposés à des agressions chimiques variées. Les conséquences de ces agressions sont souvent plus importantes que le niveau de porosité du béton est élevé. Bajja [Bajja, 2016] a montré que à cet effet que de par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, la pâte de ciment a une composition qui peut évoluer en fonction des attaques. Les études menées par Guillon [Guillon, 2004] quant à elles ont montré que les phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone ont des conséquences les plus importantes sur la durabilité du béton. Dans le cadre de cette thèse, on se propose d'analyser la réaction du béton face à ces agents agressif, en fonction du type de sable (concassé ou roulé).

I.3.2.1 Actions des acides

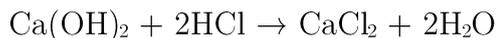
En contact avec le béton, les eaux certaines eaux souterraines plus ou moins minéralisées, avec en particulier en calcium, et neutres (pH = 7) voire acides (pH <7) réagissent avec les alcalins du ciment et provoquent des dégradations tels que la lixiviation. Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca²⁺ et hydroxyde OH⁻ [Adenot and Buil, 1992]. Leur transport vers le milieu extérieur est diffusif. Ce phénomène a été confirmé par les modélisations réalisées par [Nguyen et al., 2006; Thiery, 2006].

De manière générale, il est établi qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles [Thiery, 2006]. Les ions sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton.



L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminat de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel formé ensuite (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule ci-dessous décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Ghrici et al. [Macie et al., 2016] ont trouvé que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d'acide sulfurique que celle avec de l'addition pouzzolane naturelle et l'addition binaire (pouzzolane naturelle et filler calcaire). Cependant, dans la solution d'acide chlorhydrique, le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse. [Tamimi, 1997] a remarqué que la substitution de ciment par 50 % de cendre volante est très bénéfique en termes de résistance des bétons à hautes performances vis-à-vis de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. Avec 60 %, l'effet positif de cendre volante diminue et la perte de masse augmente.

I.3.2.2 Actions des sulfates

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition XA, environnements chimiquement agressifs [Rozière, 2007].

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut en rencontrer des concentrations élevées supérieures à 5% [Ferhati, 2016].

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et anhydrite CaSO_4), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature [Rozière, 2007]. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure. Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [Guillon, 2004]. Les mécanismes complète d'attaque sont proposés dans la thèse de Belaribi [Belaribi, 2015].

I.3.3 Le retrait

Le retrait du béton est un phénomène de variation dimensionnelle mettant en jeu des actions physiques avant, pendant ou après sa prise [Aïtcin et al., 1998]. Quatre types de

retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'autodessiccation. La première forme, qui est la plus connue, est le retrait de séchage qui se développe dans le béton durci. Les travaux de cette thèse se limiteront à l'analyse du retrait de séchage dans le but d'identifier l'impact des granulats de carrière. L'analyse comparative sera faite sur les bétons de sable roulé et de sable concassé. Pour ce qui est des autres types de retrait, le lecteur peut se référer au bulletin des laboratoires des ponts et chaussées qui détaille les différents types de retrait du béton [PC Aïtcin, A Neville, P Acker, 1998].

1.3.3.1 Manifestation du retrait de séchage (ou dessiccation)

L'une des causes de fissuration du béton est le retrait de séchage [Acker, 1992]. Le retrait de séchage est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Ces fissurations sont dues à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation.

1.3.3.2 Effets du retrait de séchage sur le béton

Une étude du phénomène de retrait de séchage a montré que les valeurs de retrait de séchage des bétons avec des sables concassés étaient supérieures à ceux des bétons avec le sable de rivière [Kou and Poon, 2009]. Ces résultats ont été expliqués par le fait que le béton à base de sable issu de pierre concassée contient des particules de diamètres inférieurs à ceux du béton de sable de rivière, ce qui conduit à des valeurs de retrait plus élevées. L'examen du retrait de séchage au cours des 180 premiers jours des mortiers avec ou sans sable concassé (0 et 15%), et avec différents types de ciment a montré que le remplacement de sable naturel par 15% de sable concassé engendre une augmentation du retrait de séchage (de 0 à 22%) à tous les âges et pour tous les ciments utilisés. En effet, il a été observé la formation de carbo-aluminate à l'incorporation du sable concassé [Limbachiya and Kew, 2008a].

Indépendamment du type de granulats utilisés, le retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand [Charron 2001; Baroghel 2001; Tazawa 1995; Justnes 1996; Zhang, 2003].

1.3.4 La carbonatation

La carbonatation consiste généralement en l'action du CO₂ de l'atmosphère qui diffuse dans les pores du béton (globalement basique, de pH>13) et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu conduit à la dissolution des hydrates, notamment de la portlandite Ca(OH)₂ qui joue un rôle de tampon sur le Ph [Thiery, 2005]. Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est

plus accessible, le pH chute à une valeur inférieure à 9, facilitant ainsi la corrosion des aciers. Dans la plupart des cas, les actions extérieures des sels (en présence d'eau) agissent sur la pâte de ciment en entraînant soit la dissolution de certains hydrates (comme la portlandite), ce qui entraîne une perte d'alcalinité, soit la formation de composés nouveaux qui peuvent être expansifs [Belaribi, 2015].

Le béton, presque toujours en contact avec l'air ambiant, est soumis à l'action du gaz carbonique (CO_2). La teneur en CO_2 de l'air, naturellement de l'ordre de 0,03% à 0,05% en volume, varie avec la température, et le milieu environnant. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 0,1%. Dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1% [Roger Lacroix, 2002]. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO_2 . Ce gaz carbonique atmosphérique, inerte vis-à-vis des bétons à l'état gazeux, se dissout facilement dans l'eau pour donner une solution d'acide carbonique (H_2CO_3) susceptible d'altérer le béton [Thiery, 2005]. La carbonatation montre un second aspect : les microcristaux de carbonate de calcium CaCO_3 qui se forment à partir des hydrates sont bénéfiques, car ils obturent partiellement les pores du béton et augmentent sa résistance à la diffusion d'agents agressifs, tels que le CO_2 [Vu, 2011].

I.3.4.2 Quelques Paramètres influençant la carbonatation

I.3.4.2.1 Le rapport E/C

De nombreuses recherches ont été réalisées pour connaître l'influence du rapport E/C sur la vitesse de carbonatation. D'après les études de Vénuat et Alexandre [Vénuat et Alexandre, 1968b], la progression de la carbonatation dans des bétons de ciment CEM I est accélérée avec l'augmentation de E/C. Loo et al. [Loo et al., 1994] quant à eux ont étudié l'influence de la teneur en ciment sur la carbonatation. Les résultats de leurs études ont prouvé que l'effet du dosage en ciment est insignifiant comparativement à celui du E/C.

I.3.4.2.2 Cure des bétons

Les caractéristiques d'un béton durci dépendent grandement des conditions de conservation qui déterminent, dans une large mesure, des réactions d'hydratation et la porosité du matériau [Thiery, 2005]. En effet, lorsque le durcissement d'un béton s'effectue dans l'eau, une réduction progressive de la porosité est observée. Il en est tout autrement si le mûrissement a lieu en contact direct avec l'atmosphère et si aucune précaution de cure humide n'est prise. Après démoulage ou décoffrage et en l'absence de cure, le béton d'enrobage proche de la surface perd rapidement son eau par dessiccation et l'hydratation de cette couche est limitée. Le degré d'hydratation est alors plus faible et la porosité plus élevée, ce qui facilite la carbonatation de cette zone.

Durant la mise en place du béton, une partie des granulats vient s'immobiliser contre les parois du coffrage et, au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher plus près des parois du coffrage que de leur rayon. Le volume occupé par le

vide entre les gros granulats est donc plus important que dans le béton de masse. Ce phénomène conditionne en partie la microstructure du béton de peau qui est plus riche en particules fines et en pâte de ciment. Cette zone est plus poreuse, ce qui contribue à faciliter la pénétration du dioxyde de carbone [Miragliotta, 2000], mais est aussi plus riche en hydrates, ce qui tend à ralentir la progression de la carbonatation et permet de maintenir un pH élevé plus longtemps. Cette deuxième caractéristique chimique est bien sûr à nuancer si la cure hydrique est insuffisante.

I.4 GENERALITES SUR LES ROCHES

Les granulats sont des petits morceaux de roches (sables et graviers) dont la taille varie de 0 à 125 millimètres. Ils sont utilisés majoritairement pour la construction d'ouvrages dans le bâtiment et les travaux publics [Arquie and Tourenq, 1990]. Ils empruntent aux roches dont ils sont issus une grande partie de leurs propriétés et en particulier toutes leurs caractéristiques intrinsèques. Ces dernières dépendent de la composition minéralogique et de la texture pétrographique [Dupont et al., 2007]. Dans le manuel de mécanique de roche [MMR, 2000], le comité Français de Mécanique des roches (CFMR) définit la roche comme étant « un ensemble de minéraux qui ont acquis des liaisons plus ou moins fortes au cours de leur histoire géologique ». Richard Maillot quant à lui, précise dans son livre « Mémento Technique des Granulats » [R. Maillot., 2001], que les roches sont formées de minéraux, définis par leur composition chimique et leurs caractères cristallographiques. A partir de ces définitions, on peut retenir qu'une roche est caractérisée par les minéraux qui la comportent, et donc il en existe plusieurs familles.

I.4.1 Origine des granulats

De manière naturelle, les granulats proviennent des roches et, selon leur mode de formation, les roches se distinguent selon trois grandes familles : les roches magmatiques, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques [Vulliet et al., 2016].

I.4.1.1 Roches magmatiques

Les roches magmatiques sont issues des profondeurs de l'écorce terrestre et sont formées lors du refroidissement plus ou moins rapide d'un mélange fondu appelé magma. Lorsque le refroidissement s'est effectué en profondeur et lentement, on parle des roches plutoniques (granites, diorites, gabbros, etc.). Lorsque le refroidissement s'est effectué rapidement, près de la surface, on parle de roches volcaniques (rhyolites, andésites, basaltes, etc.) [Dupont et al., 2007; Vulliet et al., 2016]. La figure I.3 présente des images de quelques roches magmatiques.



Figure I. 3 : Images de quelques roches magmatiques : granite (a) ; basalte (b) [Vulliet et al., 2016]

I.4.1.2 Roches sédimentaires

Les roches sédimentaires résultent de la décomposition des roches d'origine magmatique ou métamorphique et couvrent plus de trois quarts de la surface des continents et presque la totalité des fonds des océans. Elles sont caractérisées par leur épaisseur limitée (calcaires, grès, roches argileuses, etc.) [Vulliet et al., 2016]. La figure I.4 présente des images de quelques roches sédimentaires.

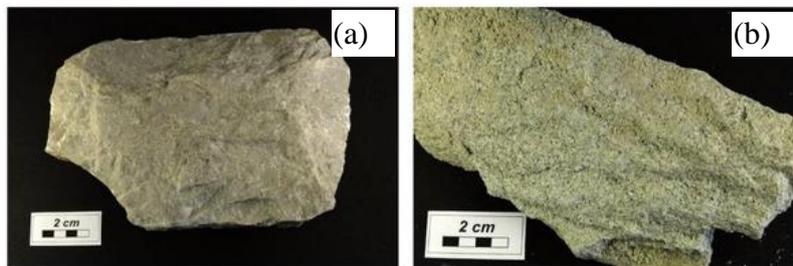


Figure I. 4 : Images de roches sédimentaires : calcaire sparitique (a) ; grès (b) [Vulliet et al., 2016]

I.4.1.3 Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques résultent quant à elles de la transformation d'une roche superficielle sous l'effet de la chaleur et/ou des pressions, leur formation est due à un phénomène de transformation à l'état solide des roches sédimentaires ou magmatiques sous l'effet de hautes pressions et/ou augmentation de la température (gneiss, leptynites, amphibolites, quartzites, cornéennes, etc.) [Dupont et al., 2007; Vulliet et al., 2016]. La figure I.5 présente des images de quelques roches métamorphiques.

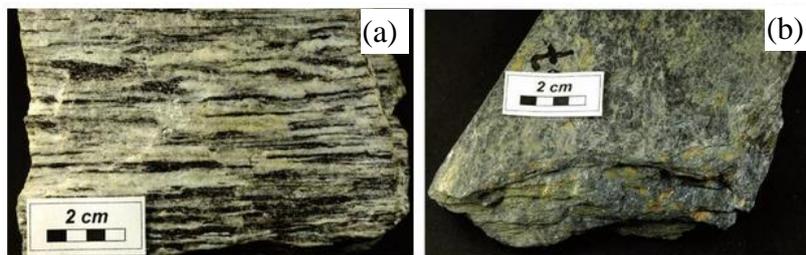


Figure I. 5 : Images de quelques roches métamorphiques : gneiss (a) ; schiste (b) [Vulliet et al., 2016]

I.4.2 Texture des roches

La texture de la roche donne une indication sur leur origine, leur formation et leurs caractéristiques pétrographiques [Demange, 2011]. La texture d'une roche est représentée

soit par un modèle classique (typiquement trouvée dans les roches sédimentaires, figure I.6), soit par un modèle imbriqué (généralement trouvée dans les roches magmatiques et métamorphiques figure I.7).

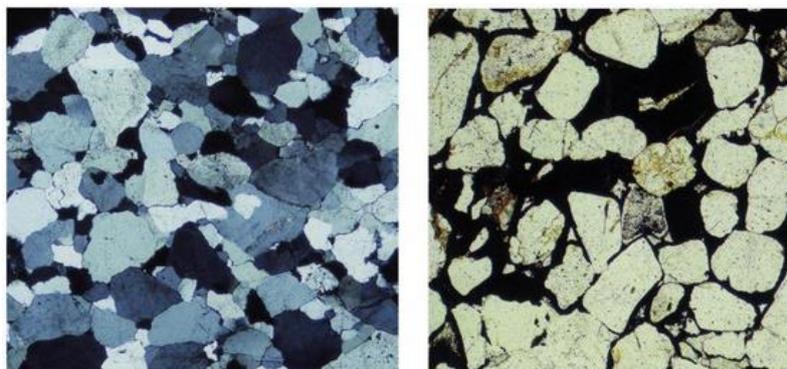


Figure I. 6 : Texture classique d'un grès [Adams et al., 1984]

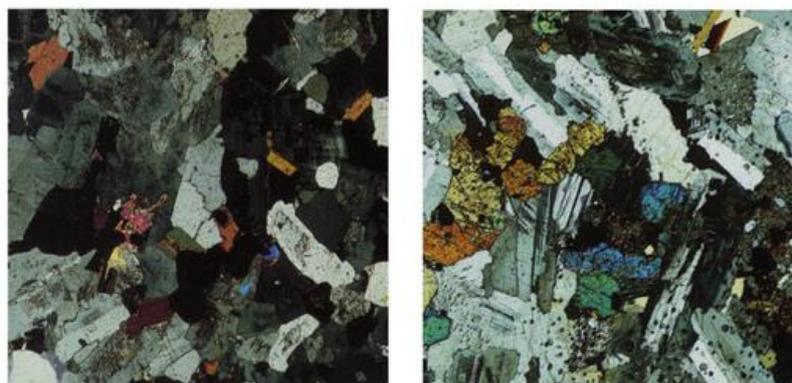


Figure I. 7 Texture imbriquée de roches magmatiques ou métamorphiques [Mackenzie et al., 1982]

La description de la texture classique inclut la forme et la taille des grains (grains bien distincts les uns des autres), ainsi que leur composition. Elle indique si le grain est plutôt sphérique ou aplati. Par contre, la texture imbriquée est caractérisée par la pénétration des cristaux sur les autres minéraux.[Vulliet et al., 2016].

I.4.3 Les roches de Yaoundé (Cameroun)

I.4.3.1 *Historique géologique*

Du point de vue historique, la géologie de Yaoundé débute au précambrien, par la formation d'un vaste géosynclinal qui va se combler par des dépôts de sédiments argilo-calcaires et gréseux [Nzenti et al., 1988]. Ces matériaux, traversés d'intrusions de roches cristallines, vont subir un métamorphisme, avec la formation du complexe calco-magnésien intensément métamorphosé (gneiss, quartzites, migmatites, etc.) [Segalen, 1966]. Bessoles et Lasserre [Bessoles and Lasserre, 1977] ont observé que la géologie rocheuse de la région de Yaoundé est majoritairement composée de Gneiss. Les études pétrologiques et structurales des paragneiss de haute pression dans la région de Yaoundé [Ball et al., 1984 ; Nzenti et al., 1988] ont permis de conclure que ces roches ont été impliquées dans une tectonique tangentielle majeure en condition catazonale (zone

profonde de la croûte terrestre, où se développe un métamorphisme de haute température (500-700 °C) et de forte pression lithostatique).

I.4.3.2 Localisation et description

L'étude de Bessoles et Lasserre [Bessoles and Lasserre, 1977] a montré que les Gneiss de Yaoundé affleurent de façon discontinue une surface considérable (200 km du Sud-Ouest au Nord-Est) et sont préservés de l'altération. La figure I.8 présente le schéma de la localisation des gneiss de Yaoundé.

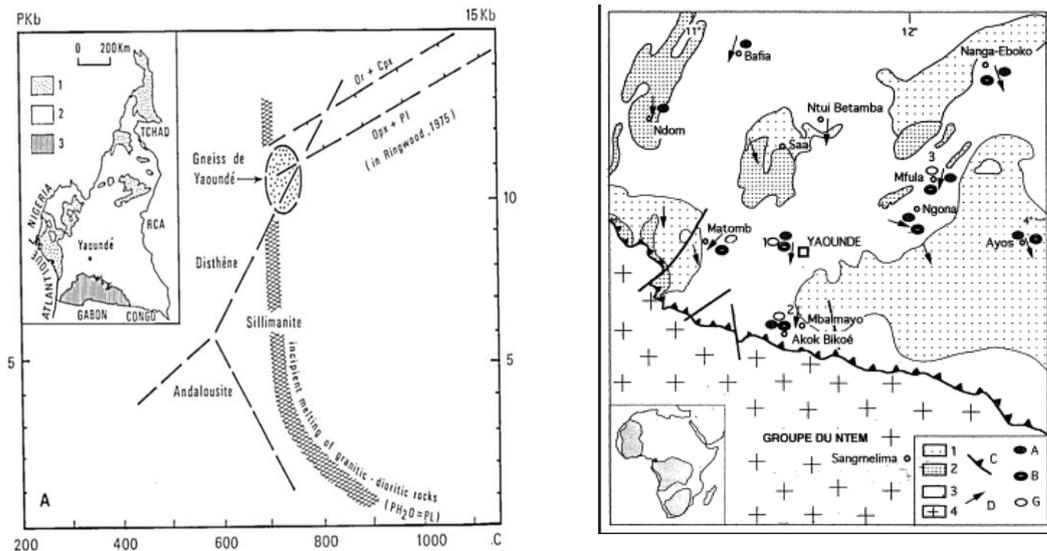


Figure I. 8 : Carte géologique schématique du Sud-Cameroun et localisation des observations. 1–3, nappe de Yaoundé : 1, micaschistes ; 2, quartzites micacés ; 3, gneiss 4, groupe du Ntem ; A, alvéoles de paroi ; B, plis en fourreaux ; C, chevauchement ; D, linéation d'étirement (direction de transport de la nappe) ; G, grottes [Nzenti et al., 1988], [Ball et al., 1984], [Vicat et al., 2002]

Les études sur les roches de Yaoundé ont montré que leur structure horizontale est en fait principalement liée à un mécanisme de cisaillements, d'histoire sûrement complexe. De manière détaillée, les arcs polygonaux des biotites et du graphite, la torsion des disthènes ainsi que la structure blastomylonitique en mortier sont sans doute liés aux derniers incréments de la déformation synschisteuse [Ball et al., 1984].

I.5 LES GRANULATS POUR BETON

Les granulats constituent une matière première indispensable au bâtiment et au génie civil, sans laquelle la réalisation des ouvrages serait aujourd'hui impossible dans l'état actuel des techniques de construction [Dupont et al., 2007]. Ils constituent le squelette du béton et améliorent sa résistance [Hafid, 2012]. Il importe de bien les connaître et de veiller au respect des spécifications réglementaires [Chabane1 and Houari2, 2008]. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silicocalcaires [CIMbéton, 2005].

I.5.1 Classification normative

La norme française [NF P18-304 - 1973] définit un type de granulat en fonction des grosseurs minimales et maximales de ses éléments : d désigne le diamètre minimum des grains et D le diamètre maximum. Un granulat est ainsi caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D . Lorsque d est inférieur à 0,5 mm, le granulat est désigné 0/ D . D'après la norme [NF P18-545 -2011], il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats :

- Les fines 0/ D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables 0/ D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm.
- Les ballasts d/D avec $d \geq 25$ mm et $D \leq 125$ mm.

Les granulats couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2000 et 3000 kg/m³ [CIMbéton, 2005].

I.5.2 Différents types de granulats

En fonction de la nature et de l'origine, on peut distinguer les granulats naturels, les granulats artificiels ou les granulats recyclés [Laneyrie et al., 2014].

- Les **granulats naturels** : ce sont des minéraux qui proviennent de roches massives ou meubles n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique ;
- Les **granulats artificiels** : ce sont des minéraux qui résultent d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres ;
- Les **granulats recyclés** : ils sont obtenus par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons uniquement aux granulats naturels, notamment les granulats des roches meubles et les granulats des roches massives.

I.5.2.1 *Les granulats de roches meubles : dits granulats de rivière*

Ce sont les granulats alluvionnaires (dits de rivière ou roulés). Ils tapissent généralement le fond des vallées et proviennent de rivières, de mers et fleuves. Ce sont tout simplement des grains et cailloux appartenant à différentes natures minéralogiques dont calcaires, silicocalcaires ou encore siliceux. Ces granulats sont naturellement dépourvus de particules argileuses nuisibles à la résistance du béton. Toutefois, certains granulats alluvionnaires sont lavés après la sélection, car ils contiennent des taux élevés de chlorures, de sulfates et d'autres impuretés qui affectent la résistance et la durabilité du béton [Ferhati, 2016]. Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de grains arrondis et polis, forme acquise par l'érosion [Augris and Cressard, 1984]. La figure I.9 présente quelques exemples de granulats roulés utilisés dans la fabrication de béton.



Figure I. 9 : Quelques granulats alluvionnaires (roulés) [A. MERDAS, 2012]

1.5.2.1 Les granulats de roches massives : dits granulats de carrière

Les granulats de roches massives (dits de carrière ou concassés) proviennent du concassage des roches dures, suite à un phénomène de transformation naturelle des roches éruptives, calcaires ou métamorphiques, ce qui leur donne des formes angulaires très variables. Ils se distinguent facilement des granulats alluvionnaires par leur aspect anguleux [Debut, 1978]. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : l'origine de la roche, la régularité du banc, le degré de concassage [Achour, 2007]. La figure I.10 illustre quelques granulats de concassage utilisés dans la fabrication de béton.

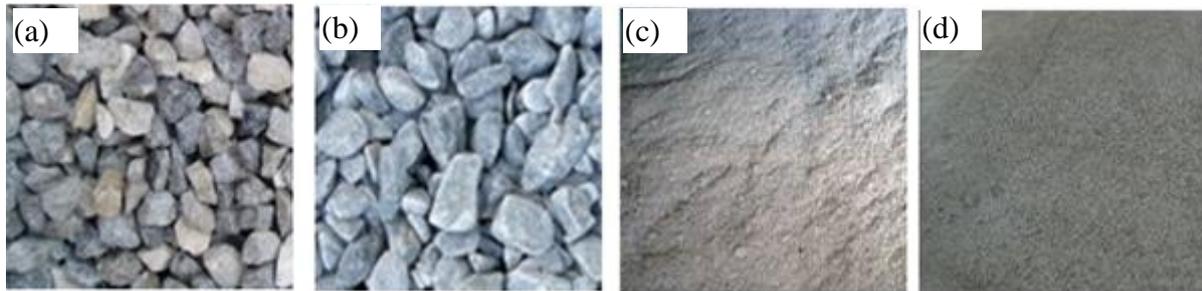


Figure I. 10: Quelques granulats de carrière : graviers 5/15 (a) ; graviers 15/25 (b) ; sable 0/6 (c) ; tout venant 0/31,5 (d) [GRACAM S.A, 2018]

1.5.3 Propriétés physiques des granulats

1.5.3.1 Propreté des granulats

A ce jour il n'existe pas de norme spécifique aux granulats du Cameroun. De ce fait, ce sont les normes françaises qui sont utilisées. La norme française [NF P 18-598-1991] recommande que les granulats utilisés dans la fabrication de bétons et mortiers, doivent être propres. En effet, les impuretés présentes dans les granulats sont susceptibles de perturber l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte, ce qui peut engendrer une baisse de résistance, mais elle peut aussi perturber la durabilité des matériaux [Barkat, 2012].

La propreté des granulats est désignée par leur teneur en fines ou d'autres particules (les scories, les particules végétales...). Ces particules doivent avoir une valeur limitée. Dans le cas des granulats alluvionnaires, la teneur en fines est donnée par le pourcentage de

passant au tamis de 0.5 mm (tamisage effectué sous eau). Généralement la teneur en fines des granulats alluvionnaires est inférieure à 4% et la valeur de l'équivalent de sable (ES) est en moyenne supérieure à 85%. En ce qui concerne les granulats issus de concassage, leur spécificité est qu'ils ont une importante teneur en fines (8 à 16%). Au-delà de ce pourcentage, les granulats concassés sont impropres à l'utilisation et doivent être traités afin de réduire leur teneur en fines [Sadhouari et al., 2009]. D'autres impuretés telles que les sulfates ou les sulfures peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement du béton [“CIMbéton,2005].

I.5.3.2 Masse volumique et densité

I.5.3.4.1 Masse volumique et densité apparente

La masse volumique apparente correspond à l'unité de volume occupé par le granulat sec. Elle peut avoir une valeur différente suivant la valeur d'humidité et suivant l'état du matériau (compacté ou non compacté). Sa valeur varie entre 1 400 kg/m³ et 1 600 kg/m³ pour les granulats roulés silico-calcaires [Descantes., 2007]. La densité apparente correspond au rapport de la masse volumique apparente d'une unité de volume du matériau à la masse d'une même quantité d'eau distillée [Vimane., 2001].

I.5.3.4.2 Masse volumique et densité absolue

La masse volumique absolue du granulat est la masse d'un matériau, déduit de tous ses vides (vides entre les grains et vides à l'intérieur des grains). Sa valeur est plus élevée que la masse volumique apparente : de 2 500 à 2 600 kg/m³ pour les mêmes granulats roulés silico-calcaires [Descantes., 2007]. La densité absolue (relative) est le rapport de la masse volumique absolue d'une unité de volume du matériau à la masse du même volume d'eau distillée [Vimane., 2001].

I.5.3.4.3 Masse volumique et densité réelle

La masse volumique réelle d'un matériau est la masse par unité de volume de matière pleine (déduction seulement des vides entre les particules). La densité réelle est le rapport de la masse volumique réelle d'une unité de volume du matériau sec dans l'air à la masse du même volume d'eau distillée [Vimane., 2001].

I.5.3.5 Résistance à l'usure des gravillons

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai « Micro-Deval » en présence d'eau, conformément à la norme NF EN 1097-1. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation et à l'usure par chocs et frottements. Cette résistance se caractérise par le coefficient « Micro-Deval : MDE » qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient "MDE" est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée [CIMbéton., 2005].

I.5.3.6 Résistance à la fragmentation des gravillons

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient de « Los Angeles », conformément à la norme NF P 18-573. Le principe de cet essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé, contenant des boulets métalliques sur plusieurs cycles (broyage à sec). Le coefficient de « Los Angeles » représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient "LA" est faible, plus la résistance des gravillons est élevée. Le coefficient "LA" peut aussi être calculé en fin d'essai à partir du passage au tamis (1.6 mm) [Vimane., 2001].

I.5.3.7 Module de finesse

Le module de finesse "Mf" est spécifique aux granulats de dimension réduite (sable). Le module de finesse d'un sable caractérise sa granularité comme le 1/100^e de la somme des refus en pourcentages, sur une série de tamis. C'est une caractéristique importante qui doit être vérifiée avec soin. Généralement un sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2.2 et 2.8. En dessous, de cet intervalle le sable contient beaucoup d'éléments fins (sable très fins), ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus de cet intervalle, le sable manque de fines (sable grossier) et le béton perd de son ouvrabilité [Zoshchuk et al., 1984].

I.5.3.3 Teneur en eau

La teneur en eau désigne la quantité d'eau contenue dans un échantillon de granulat. Elle s'exprime comme un rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec et est déterminée par la formule ci-dessous.

$$W = \frac{PE}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Dans laquelle

PE : Poids d'eau dans le matériau ;

P_s : Poids du matériau sec ;

P_h : Poids du matériau saturé ou humide.

Généralement les granulats utilisés dans le béton contiennent dans leur état initial une certaine quantité d'eau variable selon les conditions de stockage. De ce fait, la prise en compte de cette quantité d'eau dans la formulation des bétons devient primordiale [CIMbéton., 2005]. La plupart des matériaux gonflent lorsque leur teneur en eau augmente et, inversement lorsqu'elle diminue (retrait) [Vimane., 2001]. La figure I.11 montre les divers cas qui peuvent se présenter lorsqu'un granulat est poreux et qu'il est, ou a été en contact avec de l'eau.

 SEC (dessiccation jusqu'à poids constant)	 NATURELLEMENT SEC (séchage naturel à l'air)	 SATURE SURFACE SECHE	 SATURE SURFACE HUMIDE
 PAS D'EAU DANS DES PORES	 UN PEU D'EAU DANS DES PORES	 PORES REMPLIS D'EAU SURFACE SECHE	 PORES REMPLIS D'EAU SURFACE HUMIDE
SI LES GRANULATS SONT POREUX, UNE PARTIE DE L'EAU DE GACHAGE EST ABSORBEE PAR LES GRANULATS		PAS D'EGHAGE D'EAU ENTRE GRANULAT ET PATE DE CIMENT	
		L'EAU A LA SURFACE DES GRANULATS DILUE LA PATE DE CIMENT ET DOIT ETRE COMPACTEE COMME EAU DE GACHAGE	

Figure I. 11 : Les différents états de granulat avec ou sans eau [Vimane., 2001]

I.5.4 Caractérisation morphométrique des granulats

I.5.4.1 La forme

La forme des granulats est essentielle pour la détermination des propriétés telles que la compacité des mélanges, l'angle de frottement, la maniabilité [Bala et al., 2018]. Les granulats varient du plus gros au plus fin, selon les dimensions de ses grains qui les constituent. L'un des paramètres les plus importants de la forme des granulats est le coefficient d'aplatissement. Il caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur [CIMbéton., 2005]. Car une mauvaise forme a une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation. D'autre part, l'accroissement de ce coefficient a pour effet de réduire la compacité d'un mélange. Un aplatissement élevé est particulièrement préjudiciable aux enduits superficiels qui subissent une perte d'adhérence [Descantes et al. 2002]. Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation suivante :

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

Les caractéristiques géométriques de la forme des granulats sont illustrées par le graphique de la figure I.12.

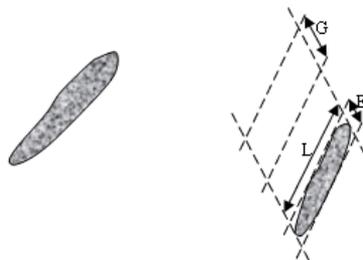


Figure I. 12 : Forme d'un granulat :

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur L représente la distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,

- L'épaisseur E représente la distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G représente la dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

I.5.4.2 Les paramètres géométriques

Les paramètres géométriques les plus importants des granulats sont : la circularité, le facteur d'aspect et la convexité.

- La circularité est une mesure de « l'écart à un cercle parfait ». La circularité est définie par la relation :

$$Cir = \frac{4\pi \times Surface}{Périmètre^2}$$

- Le facteur d'aspect est défini par le rapport entre l'axe maximal D_{max} et l'axe minimal D_{min} d'une ellipse. Cette ellipse est ajustée pour avoir le meilleur accord possible avec la particule. Une particule élancée a un rapport D_{max}/D_{min} élevé. La figure I.13 présente le principe de détermination de D_{max} et D_{min} par ajustement entre une ellipse et une particule.

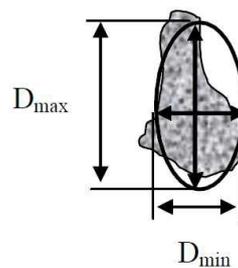


Figure I. 13 : Méthode de détermination de D_{max} et D_{min} par ajustement entre une ellipse et une particule [Zoshchuk et al., 1984].

- La convexité est une mesure de rugosité de surface et de régularité de forme de la particule. Une particule lisse aura une convexité de 1, tandis qu'une particule très rugueuse ou très irrégulière aura une convexité de 0. La convexité est définie comme le rapport entre la surface convexe de Hull divisée par la surface réelle de la particule. La surface convexe de Hull est définie par le plus petit polygone convexe qui peut contenir la région occupée par la surface de la particule. La convexité est illustrée sur un échantillon de granulat à travers la figure I.14.

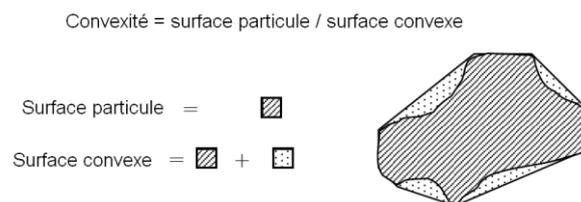


Figure I. 14 : Mesure de la convexité [Zoshchuk et al., 1984].

I.5.5 Compacité des granulats

Beaucoup de matériaux composites tels que le béton sont fabriqués avec des inclusions granulaires noyées dans une matrice liante [De Larrard, 2000]. La prévision de la compacité d'un mélange granulaire est donc un problème capital pour le béton [Johansen et Andersen 1991]. De manière rigoureuse, la notion de compacité d'un ensemble de grains dans un récipient rigide est la somme des volumes enveloppés des grains (en gris sur la figure I.15b), rapportée au volume total du contenant (somme grise + blanc de la figure I.15a) [De Larrard f., Ledran T., Brochu f., Ledee V ; 2004].

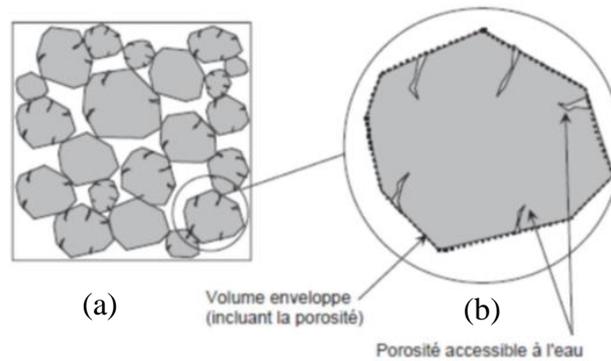


Figure I. 15 : Schéma illustrant la notion de compacité [De Larrard f., Ledran T., Brochu f., Ledee V ; 2004]

I.5.6 Empilements granulaires : Fraction volumique solide

Un empilement est l'opération permettant de trouver les différents arrangements possibles des grains afin d'optimiser le remplissage des vides par des grains [Voivret C ; 2008]. Khelifi et al., [Khelifi et al., 2013] ont montré qu'il existe des valeurs caractéristiques de fractions volumiques solides dans les empilements granulaires. Dong et al. [Dong, K.J., Yang, R.Y., Zou, R.P., Yu, A.B., 2006] ont proposé une relation permettant théoriquement de prévoir à partir de quelle fraction volumique critique ϕ_{RLP} (« random loose packing ») il est possible de former un système stable lorsque les grains sont soumis à deux forces d'interaction présentant des effets opposés (une force d'attraction entre grains F_i poussant à la création d'un réseau et une autre force F_j poussant à la destruction de ce même réseau) et ϕ_m la fraction dense (« dense packing fraction ») [Lecompte, T., 2015].

$$\phi_{RLP} = \phi_m \left(1 - \exp \left(-2,457 \left(\frac{F_i}{F_j} \right)^{-0,212} \right) \right)$$

Cette approche a été utilisée dans certains travaux sur la stabilité des matériaux cimentaires [Perrot, A., Lecompte, T., et al., 2012].

Selon Martinie et al., [Martinie et al., 2010] pour une faible fraction volumique, le système peut être considéré comme semi-dilué (figure I.16) et les interactions entre les particules sont hydrodynamiques. Cela a été expliqué par le fait que le mouvement de particules telles que des grains de sable ou de gravier dans une pâte de ciment implique un certain écoulement ou une déformation de la pâte de ciment, qui peut elle-même affecter les vitesses d'écoulement ou le déplacement d'autres particules.

À des fractions volumiques plus élevées, des contacts directs peuvent se produire entre les particules du mélange. La prédominance des contacts dans le comportement physique résulte de l'existence d'une quantité considérable de contacts dans la suspension [Martinie et al., 2010]. Les chercheurs sont arrivés à la conclusion que cette situation peut être associée à l'existence d'un réseau continu de particules en contact (figure 16.b). Cela a été expliqué par le fait que, le phénomène est associé à un processus de percolation, il se produit lorsque la fraction solide est plus grande qu'une fraction critique. Lorsque cette fraction volumique solide de percolation est atteinte, il existe alors une contrainte seuil qu'il faut dépasser pour mettre le matériau en mouvement. La figure 16.c présente la fraction volumique de l'empilement dense.

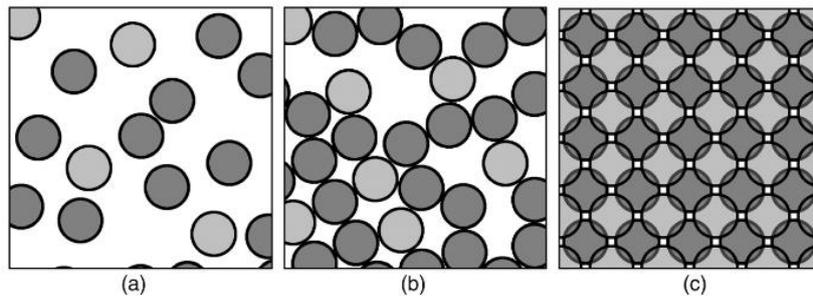


Figure I. 16 : Modes de compactage dans le cas d'inclusions rigides sphériques. (a) Régime semi-dilué ; (b) empilement libre aléatoire ; (c) empilement dense [Martinie et al., 2010]

L'étude de la caractérisation rhéologique des pâtes granulaires demeure un vaste champ de recherche [Coussot, 2005], dans le but de mieux comprendre l'influence du type et des caractéristiques granulaires sur la rhéologie du béton. Dans étude de la rhéologie des pâtes granulaires, Ovarlez [Ovarlez, 2011] proposé un modèle sous forme analytique qui permet de prédire la valeur seuil d'écoulement des suspensions bidisperses:

$$\frac{\tau_y(\phi)}{\tau_y(0)} = \sqrt{(1-\phi)(1-\phi/\phi_{div})}^{-1,43}$$

Dans laquelle $\tau_y(\phi)$ est le seuil de la suspension pour une fraction volumique, ϕ ; ϕ_{div} est la fraction volumique du modèle empirique.

Les chercheurs ont développé un modèle donnant les valeurs des consistances adimensionnées $\eta_{HB}(\phi)/\eta_{HB}(0)$ en fonction de la fraction volumique, ϕ ainsi que le la fraction volumique du modèle empirique ϕ_{div} . Ces valeurs des consistances adimensionnées sont données par la relation suivante :

$$\frac{\eta_{HB}(\phi)}{\eta_{HB}(0)} = (1 - \phi / \phi_{div})^{-1,07} (1 - \phi)^{1/4}$$

L'étude a permis de montrer qu'il est possible de prédire la valeur de l'ensemble des caractéristiques rhéologiques des suspensions bidisperses à partir de la seule donnée du comportement linéaire de la suspension mono disperse. Cela a été réalisé à l'aide d'un modèle micro mécanique afin de prédire la valeur de leurs propriétés non linéaires et d'un modèle d'empilement pour prédire la valeur de fraction volumique de divergence ϕ_{div} des propriétés rhéologiques [Ovarlez, 2011]. Dans cette étude, les valeurs des consistances adimensionnées mesurées $\eta_{HB}(\phi) / \eta_{HB}(0)$, de deux sables concassés et d'un sable roulé sont représentées en fonction de la variation de la fraction volumique ϕ (figure I. 17).

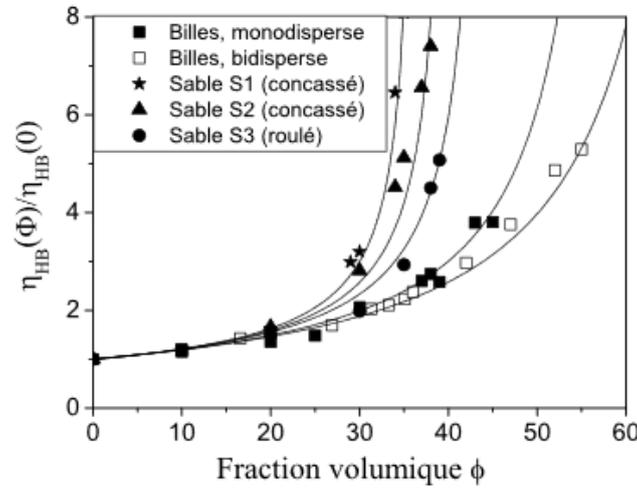


Figure I. 17 : Evolution comparative de la consistance adimensionnée $\eta_{HB}(\phi) / \eta_{HB}(0)$ du modèle monodisperse, du modèle bidisperse, de deux sables concassés en fonction de la fraction [Ovarlez, 2011]

I.6 UTILISATION DES GRANULATS CONCASSES DANS LES BETONS ET MORTIERS

Dans cette section, nous présenterons les principaux résultats des recherches effectuées sur l'utilisation du sable de concassage et son influence sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état frais et durci. Au préalable, nous présentons quelques paramètres caractéristiques des sables de concassage qui peuvent avoir une influence sur les priorités du béton.

I.6.1 Cadre réglementaire

L'un des paramètres les plus importants dans les sables issus de concassage est le pourcentage de particules fines qu'ils contiennent. La norme européenne [NF EN 206/CN, 2019] limite ce taux à 16%. En Algérie, le ministère de l'habitat recommande de ne pas dépasser un taux de fines de 15% pour les bétons de résistance à la compression comprise entre 20 et 35 MPa ; et de pas dépasser 12% pour les bétons de résistance supérieure à 35 MPa [Khouadjia, 2016]. Au Cameroun, aucune recommandation

spécifique n'est actuellement disponible et très peu d'études scientifiques ont été menées sur le sujet. Par ailleurs, de nombreuses études sur l'utilisation du sable de carrière dans la formulation de béton ont été menées ces dernières années par des chercheurs de diverses régions du monde. Les résultats de ces études montrent que l'utilisation du sable de carrière a une influence sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état frais et durci.

I.6.2 Effect sur la compacité granulaire

L'étude de l'évolution de la compacité en fonction de la forme (concassé et roulé) et la taille des grains a été réalisée par De Larrard. et al., [De Larrard F. et al., 1999]. L'étude a révélé que les compacités des mélanges augmentent avec la grosseur des grains (figure I.18). Ce phénomène est beaucoup plus accentué pour le sable roulé par rapport au sable concassé. En effet, les grains arrondis sont plus compacts que les grains concassés. Toutefois, il a été observé que c'est surtout la vibration qui est en cause car, malgré des efforts, elle a été probablement plus efficace pour les gros grains que pour les petits grains. En effet, ces derniers présentent un plus grand nombre de points de contacts dans le volume unité, ce qui pénalise l'efficacité de la vibration. En outre, il ne semble pas qu'une loi générale gouverne les relations entre la taille et la compacité des granulats [De Larrard F. et al., 1999].

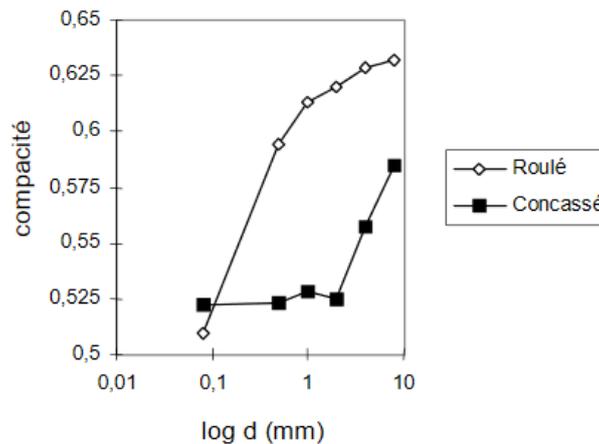


Figure I. 18 : Compacités expérimentales des classes élémentaires en fonction de la taille des grains [De Larrard F. et al., 1999]

I.6.3 Effect de la nature du granulat sur le modèle d'empilement compressible et sur la compacité granulaire

Plusieurs études de l'analyse de la compacité en fonction de la proportion de grains de taille de moitié inférieure à celle de la taille maximale (coefficient A), obtenue par la méthode de Dreux, [Dreux 1970] ont été réalisées comparativement entre les granulats roulés et concassés [De Larrard F., 1999]. La valeur optimale de A a été recherchée expérimentalement, pour chaque famille de granulats (figure I.19). L'étude a permis d'observer que l'accord entre modèle et expérience est excellent pour les granulats roulés

(erreur moyenne de 0,34%, même optimum). En outre, il est montré que cela est valide pour les granulats concassés (erreur moyenne de 1,26%).

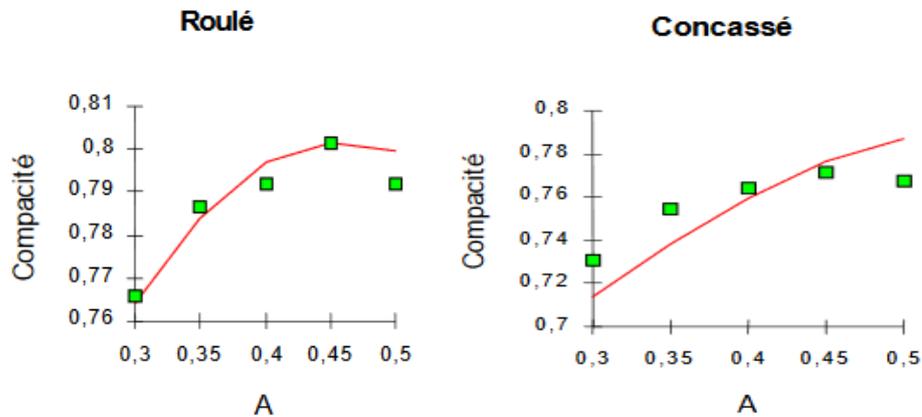


Figure I. 19 : Effet de A (proportion de grains de tailles moitié de celle du plus gros granulat) sur la compacité, dans la courbe granulaire type de Dreux [De Larrard F. ; 2009]

La même étude expérimentale de validation du modèle d'empilement compressible a été réalisée comparativement avec les sables concassés et roulés. Les résultats expérimentaux ont été comparés à ceux de la théorie. Cette comparaison est illustrée à par le graphique de la figure I.20. L'étude a montré qu'avec les granulats concassés, on retrouve la même tendance que lors des expériences d'étalonnage, avec toutefois une erreur moyenne supérieure à celle des granulats roulés, égale ici à 1,31% [De Larrard F. ; 1999].

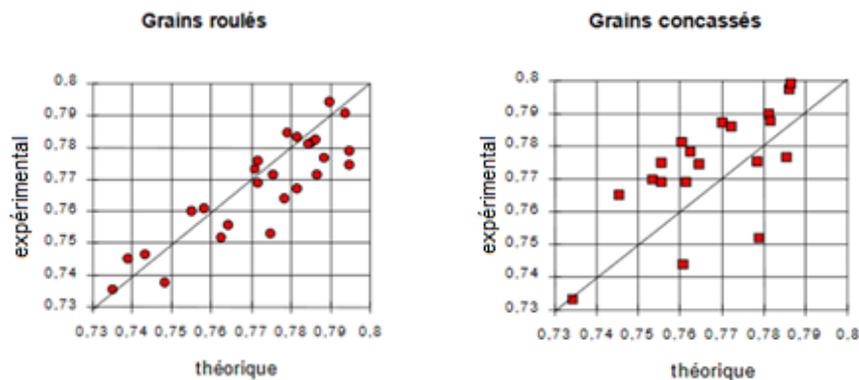


Figure I. 20 : Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires [De Larrard F. et al., 1999]

I.6.4 Effets du sable de carrière sur les bétons et les mortiers à l'état frais : demande en eau/ciment et rhéologie

Lors de la phase de coulage du béton, il se produit un effet qui induit des dissipations d'énergie supplémentaire, de sorte que la viscosité apparente de la pâte de ciment plus les grains est supérieure à celle de la pâte de ciment seule. Ainsi, la viscosité apparente d'un béton augmente avec la fraction volumique des inclusions [Martinie et al., 2010].

Cette situation est influencée entre autres par le type de sable utilisé. Le mouvement de particules telles que des grains de sable ou de gravier dans une pâte de ciment implique un certain écoulement ou une déformation de la pâte de ciment, qui peut elle-même affecter les vitesses d'écoulement ou le déplacement d'autres particules. [Martinie et al., 2010].

1.6.4.1 Effet sur la demande en eau et en ciment

Plusieurs recherches ont été menées sur l'effet du sable concassé sur la demande en eau et en ciment [Nanda et al., 2010; Bederina et al., 2013]. L'étude de l'effet des fines de sable concassé sur l'absorption d'eau réalisée par Nanda et al. [Nanda et al., 2010] a montré que les éprouvettes de béton contenant 75% de sable concassé absorbent plus d'eau (7%) que celles ne contenant pas de sable de concassé (1,7%). Bederina et al., [Bederina et al., 2013] quant à eux ont montré que l'absorption d'eau dans le sable concassé était de l'ordre de 4.3% au lieu de 0.58% pour le sable de rivière.

1.6.4.2 Effet sur la maniabilité

La maniabilité est la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise, avant que le matériau ne durcisse, la fluidité du béton. De nombreuses études se sont intéressées à la maniabilité du béton composé de sable de carrière. La maniabilité du béton fabriqué avec du sable concassé est inférieure (6 à 11%) à celle du béton fabriqué avec du sable naturel [Ahmed et al., 2010]. Les meilleures valeurs de maniabilité sont obtenues par l'incorporation de 50% de sable concassé par rapport au sable roulé [Rmili et al., 2009]. Les travaux réalisés par certains chercheurs ont montré que la maniabilité des bétons à base de sable de carrière était inférieure à la maniabilité des bétons à base de sable de rivière. Cela est expliqué par la forme angulaire et la morphologie des grains concassés par rapport à celles du sable de rivière [Kou and Poon, 2009; Melais and Achoura, 2011; AKROUT, K. et al., 2010]. L'amélioration de la maniabilité des bétons à base de sable de concassage nécessite l'utilisation de superplastifiant. L'ajout de superplastifiant permet de maintenir le rapport eau/ciment constant et d'obtenir la même consistance [Baum et al., 2006]. L'étude de l'effet du type de sable sur la fluidité du mortier a quant à elle montré que la maniabilité des mortiers diffère selon l'origine minéralogique. Aussi, les mortiers à base de sable calcaire présentent une plus grande maniabilité que ceux à base de dolomie ou de granite [Cabrera et al., 2010]. Cela est associé aux caractéristiques physiques des particules : la forme et la texture des particules (angularité), la finesse et la teneur en fines du sable concassé.

D'après les travaux de Westerholm et al., [Westerholm et al., 2008] sur l'étude de l'influence des caractéristiques des agrégats fins sur les propriétés rhéologiques des mortiers, avec un ciment CEM II/A-L 42.5 R, l'utilisation du sable concassé présente des inconvénients par rapport au sable alluvionnaire. En effet, l'étude a révélé que les propriétés et la quantité de granulats fins ont une forte influence sur la demande en eau

et la maniabilité du mortier. Les grandes quantités de fines augmentent principalement la limite d'élasticité du mortier et contribuent également à augmenter la viscosité plastique par une augmentation de la friction entre les particules, avec une augmentation du volume de pâte. Il y a donc une augmentation de la demande en ciment pour remédier au préjudice de la forme angulaire des granulats concassés.

I.6.4.3 Effet sur l'affaissement

L'affaissement, aussi connu sous le nom de « slump », permet de caractériser la consistance du béton. Une étude réalisée avec des sables de carrière de plusieurs sources minéralogiques a montré que la teneur en fines des sables, quelles que soient leurs origines minéralogiques, a un impact sur la teneur en eau et sur la rhéologie du béton [Cabrera et al., 2010]. Une teneur en fines est optimale quand elle permet la lubrification, le compromis sur sa quantité minimale doit être atteint.

Une étude de l'influence de la source minéralogique de trois différents sables concassés (Granit, calcaire et Mâchefers), sur le comportement du béton (même rapport E/C) et utilisant un ciment Portland ordinaire CEM II/A-L 42.5 R et un rapport E/C de 0,3 [Al-Ameeri, 2012] a montré que le sable concassé issu de granite apparaissait comme étant le plus avantageux (résistance à la compression, ouvrabilité). Ce comportement a été attribué à la morphologie des particules de sable de granite. En effet, la texture et la forme des particules de sable concassé ont une grande influence sur l'association de la pâte et des granulats. Par ailleurs, une analyse de l'affaissement des bétons contenant du sable de concassage a montré que l'affaissement du béton diminue au fur et à mesure que le pourcentage de sable concassé augmente [Nanda et al., 2010].

Les résultats du test d'affaissement mené par Belaidi et al. pour différents pourcentages de substitution volumique (25%, 50%, 75%) du sable de rivière par du sable concassé ont montré que l'augmentation du pourcentage de particules fines induit une baisse de l'affaissement [Belaidi et al., 2016]. Ces résultats sont expliqués par l'augmentation de la finesse et de la surface spécifique, raison de l'augmentation de la teneur en particules fines. Cela conduit à augmenter le volume de pâte cimentaire pour garder les mêmes propriétés en écoulement.

I.6.5 Effets du sable de carrière sur le béton et mortier à l'état durci

I.6.5.1 Effet sur la porosité

Le béton est un matériau poreux. Cette porosité est influencée par plusieurs paramètres. Quelques études récentes ont porté sur la variation de la porosité du béton en fonction du taux de particules fines de sable concassé [Gonçalves et al., 2007; Menadi et al., 2009]. Les résultats de ces recherches ne sont pas toujours concordants. En effet, selon Gonçalves et al, [Gonçalves et al., 2007] la porosité du béton diminue avec l'augmentation des fines. En effet, la porosité des bétons à base de sable de carrière semble être plus influencée par la forme et la source des particules que par la quantité de fines. En effet,

il la forme angulaire favorise la formation des vides intergranulaires [Gonçalves et al., 2007]. Menadi et al, [Menadi et al., 2009] ont travaillé avec du sable de carrière concassé avec une taille des particules allant de 80 μm à 4 mm, la densité apparente, le module de finesse et l'équivalent sable de valeurs respectivement de 2,54 kg/m³, 2,78 et 70 %. Ils ont montré que la porosité des bétons diminue avec la diminution des fines. En effet, le remplacement de 15 % de sable de concassage de calcaire a permis de diminuer la porosité de 17,5 % [Menadi et al., 2009b].

I.6.5.2 Effet sur la durabilité : Résistance aux attaques chimiques

I.6.5.2.1 Résistances aux attaques d'acide

L'étude de la pénétration des ions chlorures dans le béton à base de sable de concassage a montré que la pénétration des chlorures dans le mélange de béton à base de sable issu de concassage était supérieure à celle du béton avec du sable de rivière. Les valeurs les plus élevées étaient constatées dans les bétons contenant 15% de particules fines [Menadi et al., 2009b], [Kou and Poon, 2009].

Nanda et al. [Nanda et al., 2010] ont orienté leurs recherches vers deux aspects de durabilité des bétons :

- Le premier aspect est l'étude de la perte de masse par immersion des éprouvettes dans une solution acide. Les résultats ont montré que la perte de masse des bétons contenant du sable concassé était inférieure à celle des bétons contenant du sable de rivière.
- Le deuxième aspect est l'étude de la perte de masse par immersion des éprouvettes dans une solution alcaline (NaOH). Les résultats ont montré que la perte de masse dans le béton avec le sable de rivière est inférieure à celle du béton contenant du sable concassé d'environ 0.6%. Cela est expliqué par le fait que les fines contenues dans le sable concassé sont plus réactives avec une solution alcaline.

La perte de masse des différents échantillons à base de sable de carrière et de sable de rivière dans la solution d'hydroxyde de chlore (HCl) des sables concassés est inférieure de 84,4% à celle des sables de rivière. Ces résultats sont expliqués par le fait que le sable concassé est plus dense, et que la présence de fines dans le sable concassé permet de réduire considérablement la perte de masse [Bederina et al., 2013].

I.6.5.2.2 Résistance aux attaques sulfatiques

Dans une étude de la résistance du béton autoplaçant à l'attaque par des sulfates [Badogiannis et al., 2005], l'accroissement du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et l'augmentation du rapport Eau/Liant équivalent, a été constaté. En effet, quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc la pénétration des agents agressifs plus difficile [La durabilité des bétons, 1992] (figure I.21).

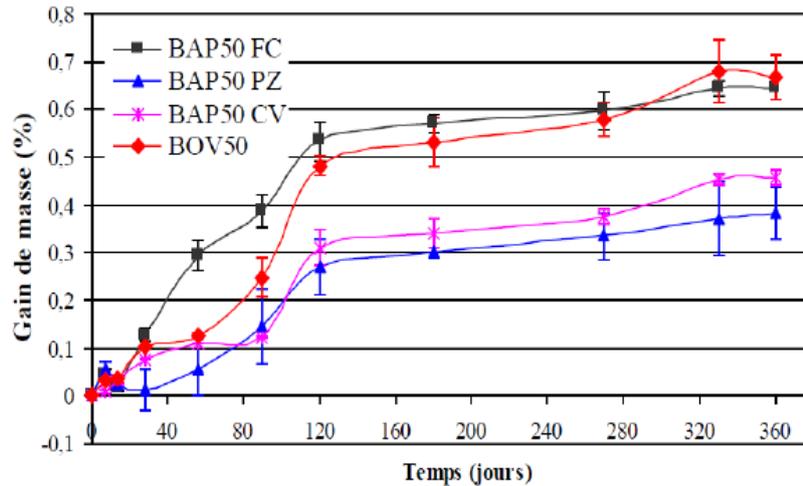


Figure I. 21 : variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [La durabilité des bétons, 1992].

Felix Kala en 2013, [Felix Kala. et al., 2013] a présenté le résultat d'une expérience menée pour évaluer les propriétés de résistance du béton mélange dans lequel le sable naturel a été partiellement remplacé par du granit. La poudre et le ciment ont été remplacés par 7,5 % de fumée de silice, 10 % de cendres volantes, 10 le laitier et le dosage du superplastifiant ajouté à 1% en poids du ciment et à 100 %) de la poudre de granit en poids. La résistance à la compression était de déterminée à 1, 3, 7, 14, 28, 56 et 90 jours. La résistance à la traction a été déterminée à 1, 28 et 90 jours. La résistance à la flexion a été déterminée à 1, 28 et 90 jours. Le module d'élasticité a été déterminé comme étant de 7, et 28 jours. Le test d'absorption d'eau a été déterminé à 1, 2 heures. Les résultats de l'essai montrent qu'une quantité marginale de granit comme le remplacement partiel du sable a un effet bénéfique sur les propriétés ci-dessus.

1.6.5.3 Effet sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité statique du béton est une grandeur intrinsèque au béton. Il est défini par le rapport d'une contrainte à la déformation dans le domaine élastique. L'analyse du module d'élasticité des bétons à base de sable concassé a abouti au fait que le module d'élasticité des bétons de sable concassé est inférieur à celui des bétons à base de sable de rivière. Ce phénomène est expliqué par le fait que l'évolution du module d'élasticité est étroitement liée à la texture, à la forme et à la rigidité des gros granulats [Sabbagh, 2002] [Al-Baghdidi et Al-Ameeri].

Les essais effectués par [Piasta et al., 2017] sur des roches à partir de granulats (basalte, granite, dolomie, quartzite) et sur des bétons ordinaires et à haute résistance ont révélé les facteurs qui affectent les résistances mécaniques et le module d'élasticité du béton. Tous les mélanges ont été préparés en utilisant un ciment Portland ordinaire CEM I 42.5. Le module d'élasticité a augmenté pour les bétons produits avec des agrégats composés principalement de quartz (quartzite et granite).

Une augmentation beaucoup plus importante des valeurs du module d'élasticité a été observée pour les bétons fabriqués avec des agrégats de dolomie et de basalte. Ceci est probablement lié à une bonne adhérence de la pâte. En outre, les auteurs ont conclu que les agrégats peuvent fournir une augmentation significative du module d'élasticité dans le béton ordinaire et dans le béton à haute résistance.

Kala [Kala, F., 2013] a étudié l'effet de la poudre de granite sur la résistance mécanique d'un béton dans lequel le sable naturel a été partiellement remplacé par du granite usuellement utilisé ; la poudre de granite et le ciment ont été remplacés par 7,5 % de fumée de silice, 10 % de cendres volantes, 10 % de laitier et le dosage de superplastifiant ajouté à 1 % en masse de ciment. Le granulats fin a été remplacé par cinq pourcentages massiques (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %) de poudre de granite. Les résultats des essais ont montré qu'une quantité même marginale de granite en remplacement partiel du sable a un effet bénéfique sur les propriétés du module d'élasticité.

1.6.5.4 Effet sur la résistance mécanique

Les travaux expérimentaux menés par Leroy et al. [Leroy et al., 2017] ont porté sur la résistance à la compression à 28 et 90 jours de différents types de bétons. La résistance à la compression du béton fabriqué avec du granulats de rivière, (béton de classe normal CN), est de 37 MPa, tandis que celle du béton composé de 25% de sable de rivière et 75% de gneiss concassé est de 35 MPa. L'analyse suggère qu'une substitution volumique partielle de 75% du sable de rivière par du sable concassé peut être utilisée efficacement dans la production de béton sans affecter la résistance à la compression du béton. Cependant, cette analyse ne prend pas en compte la nature minéralogique des granulats. Khouadjia et al. [M. L. K. Khouadjia et al., 2015] ont indiqué qu'à l'état frais et durci, le comportement du béton est différent selon la formulation du mélange et les caractéristiques des sables. Ces auteurs ont montré que la meilleure résistance à la compression à 28 jours a été obtenue sur un béton en présence de faible teneur en particules fines (2,8%). La même étude a montré que la résistance à la compression la plus élevée à tous les âges était obtenue avec un béton de granulats de quartzite, suivi par le gravier de rivière et ensuite par les granulats de granite.

Les travaux de Joudi et al., sur l'étude de l'influence des sables de concassage à différents taux de filler ($d_m \cong 2 \mu m$) sur les performances mécaniques des bétons ont montré que les bétons qui ne contiennent pas de fines présentent les plus faibles valeurs de résistance à la compression, comparativement aux bétons contenant 12% de fines. L'étude a également montré qu'au-delà de ce pourcentage (considéré optimum pour les bétons courants), les performances diminuent [Joudi et al., 2012]. L'explication donnée que les fillers calcaires issu du sable de concassage améliorent l'adhérence entre le ciment et les granulats.

L'étude réalisée par Menadi et al., [Menadi et al., 2009b] a montré une diminution des propriétés mécaniques lorsque le taux de fines atteint 15% dans le béton. La baisse de la

résistance était expliquée par le fait que l'augmentation de la teneur en fines conduit à ce que toutes les particules d'agrégats ne soient pas suffisamment enrobées de ciment. Les études de [Benabed et al., 2012] et [Makani, 2011] sur la résistance à la compression des mortiers et bétons à base de sable de carrière et sable de rivière à différents pourcentages de substitution (de 20% à 75%) ont montré qu'il y avait une augmentation de la résistance à la compression, à la flexion et à la traction de l'ordre de 1 à 33%.

L'étude sur la résistance et la durabilité du béton incorporant du sable calcaire concassé, menée par Menadi et al. [Menadi et al., 2009b], avec le même rapport eau/ciment (E/C) de 0,65 et une teneur en ciment Portland de 350 kg/m³, a montré qu'un maximum de 15% des fines (<80µm) contenues dans le sable concassé pouvaient être utilisées sans affecter la résistance à la compression du béton. D'autres auteurs ont travaillé sur l'influence de la source minéralogique de trois différents sables concassés (Granite GS, Calcaire LS et Laitier d'acier SS) sur le comportement du béton (même rapport W/C de 0,30). Ils ont montré que le sable concassé provenant du granite semblait être le plus avantageux en ce qui concerne les valeurs élevées de résistance à la compression) [AL-Ameeri, 2012].

Sadhouari et al., ont montré que les courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de fines présentent la même allure, quel que soit l'âge des différents types de bétons. D'après cette étude, et comme le montre la figure I.22, la résistance à la compression augmente avec le taux de fillers pour atteindre un maximum vers 15% de fines cela est suivi d'une chute modérément. Ce résultat est observé à toutes les échéances [Sadhouari et al., 2009].

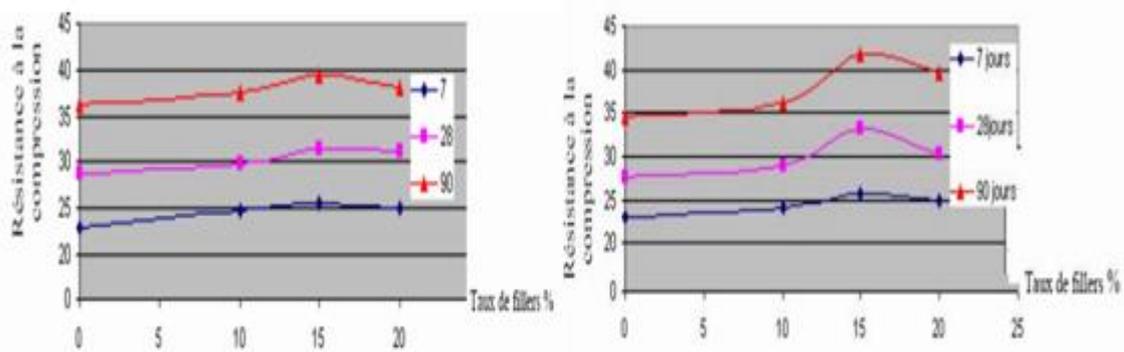


Figure I. 22 : Résistance à la compression de bétons à différents taux de fillers [Sadhouari et al., 2009]

I.6.6 Résistance à la traction

I.6.6.1 Relation entre résistance à la traction et résistance à la compression

Plusieurs études ont été réalisées pour calculer la résistance à la traction du béton à partir du mécanisme de fracturation [Lange-Kornbak et Karihaloo 1996]. Mais à nos jours, aucun modèle n'est encore disponible pour prédire théoriquement les paramètres de la mécanique de la rupture [De Larrard, 1999].

Seulement, ce qui est réalisé est l'approche empirique traditionnelle qui consiste à relier la résistance à la traction à la résistance à la compression.

Les études menées par Oluokun [Oluokun 1991, De Larrard, 1999], ont permis de se rendre compte que la plupart de ces relations sont des "lois de puissance". L'étude a utilisé 566 valeurs, et a permis de proposer la relation suivante :

$$f_t = 0,214 f_c^{0,69}$$

Avec f_t la résistance à la traction par fendage du béton et f_c la résistance à la compression au même âge. Ce qui correspond au meilleur lissage des données considérées (figure I.23). Par analyse statistique, cet auteur confirme que l'âge du béton n'affecte pas de façon significative la relation (f_t , f_c) [Oluokun et al. 1991].

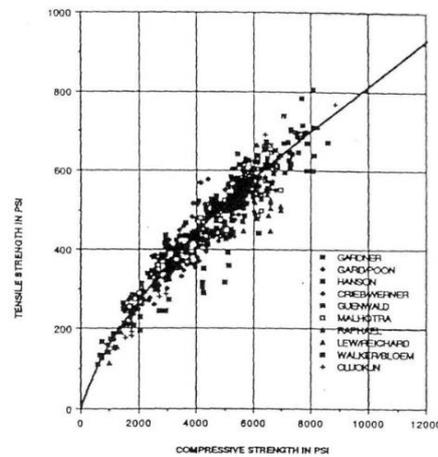


Figure I. 23 : Résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression [Oluokun 1991].

Les études réalisées par De Larrard, [De Larrard 1988] sur un béton performant conservé dans l'eau, entre 1 et 28 jours ont permis de mesurer la résistance à la traction et à la compression (voir figure I.24). Ces études ont également permis de trouver une équation semblable reliant les deux caractéristiques mécaniques :

$$f_t = 0,468 f_c^{0,57}$$

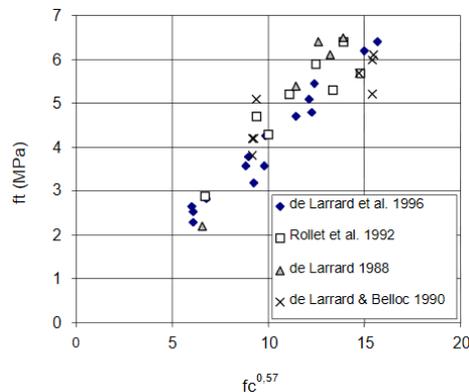


Figure I. 24 : Comparaison de la résistance à la traction et de la résistance à la compression (élevée à la puissance 0,57), pour des bétons de résistance normale et de haute résistance.

I.6.5.2 Effet de la nature du granulat sur à résistance à la traction par fendage

De Larrard et al., [de Larrard et Belloc 1997] ont élaboré à travers toutes les études présentées le modèle suivant :

$$f_t = k_t f_c^{0.57}$$

Où k_t est un coefficient qui dépend essentiellement du granulat. Des questions se sont posées sur l'influence de la nature du granulat (propriétés mécaniques de la roche) et sur l'influence de l'arrangement spatial des grains. Pour répondre à cette question [de Larrard et Belloc 1997] ont fabriqué des mortiers et des bétons avec la même pâte et des granulats provenant de cinq sources différentes. Les valeurs k_t , sont reportées sur la figure I.25 en fonction de la dimension maximale du granulat (D_{max}) [De Larrard 1999].

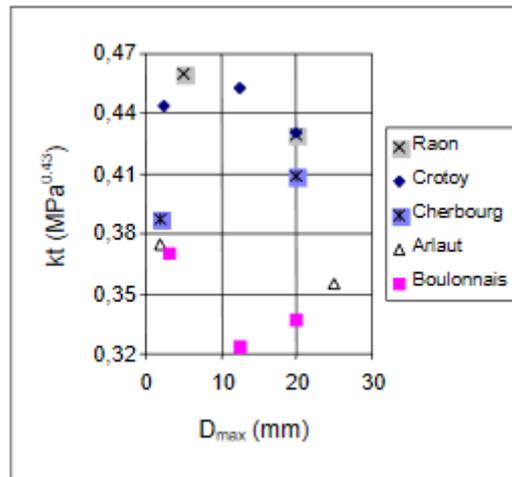


Figure I. 25 : Coefficients k_t calculés pour une série de mortiers et bétons qui ont la même pâte et des granulats différents [de Larrard et Belloc 1996]

L'étude a montré que D_{max} n'a aucun effet systématique sur k_t , encore moins l'épaisseur maximale de pâte qui est un paramètre plus physique [De Larrard 1999]. Ainsi, le paramètre k_t est principalement contrôlé par la nature de la roche (propriétés mécaniques et pétrographiques), indépendamment de la distribution de la taille ou de la concentration en granulats dans le matériau. Il ressort également que les granulats siliceux présentent un coefficient k_t plus important que celui des calcaires [De Larrard 1999].

I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons proposé une synthèse des connaissances sur l'utilisation du sable de concassage et ses effets sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état frais et durci. Très peu d'études ont été réalisées en Afrique subsaharienne, et plus singulièrement au Cameroun.

En résumé, les travaux existants suggèrent que le sable de concassage est une solution intéressante, à condition que sa teneur en fines soit optimale ou bien qu'il soit combiné avec du sable alluvionnaire. Il ressort également de l'état de l'art que l'influence du sable de concassage sur les propriétés du béton dépend des propriétés minéralogiques du sable. Cet état de l'art a permis de constater que la plupart des travaux sur l'utilisation du sable de concassage sont plus focalisées sur son influence sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons et mortiers. Très peu d'études ont été orientées vers l'étude de la microstructure des bétons et mortiers. Il ressort également que la majorité de ces études ont porté sur les granulats et sables calcaires. En outre, on note peu de recommandations pratiques sur les proportions de sables de carrière à utiliser dans la formulation du béton.

Dans le but d'améliorer l'état des connaissances sur la substitution du sable de rivière par du sable concassé, nous nous proposons dans cette thèse de faire une étude de la microstructure, de l'ouvrabilité, de la durabilité et du comportement mécanique du béton et mortier à base de sable de carrière, combiné au sable de rivière.

Chapitre II. MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

II.1 INTRODUCTION

La revue bibliographique a montré un intérêt croissant des recherches sur l'utilisation du sable de concassage dans la formulation de bétons et mortiers. Cet état de l'art a permis de constater que la plupart des études menées sont principalement focalisées sur les comportements mécanique et rhéologique de bétons et mortiers contenant du sable de concassage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériaux utilisés, ainsi que les procédures expérimentales permettant la caractérisation des matériaux de base des bétons et des mortiers formulés. Dans un premier temps, nous présenterons les essais, les normes et les appareils utilisés pour déterminer les propriétés physico-chimiques, pétrographiques et minéralogiques des granulats utilisés. Ensuite, les procédures de formulations des bétons et mortiers seront détaillées. Les procédures expérimentales permettant de caractériser les bétons à l'état frais et durci, ainsi que la caractérisation mécanique des mortiers seront également présentées. Ces procédures d'essais mécaniques et de durabilité seront complétées par les équipements d'étude microstructurale utilisés : microscope électronique à balayage (MEB) équipé de spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS), appareil de diffraction aux rayons X (DRX) et d'analyse thermogravimétrique (ATD).

II.2 MATIERES PREMIERES

II.2.1 Origine et localisation des matières premières

Les matières premières (granulats et ciment) utilisés dans le cadre de ce travail proviennent tous de la région de Yaoundé (Cameroun). Ce choix est justifié par l'exploitation de plus en plus grandissante de la région montagneuse autour de Yaoundé pour la production des granulats ces dernières années. On dénombre à nos jours plus de 8 sites d'exploitation et de productions de granulats dans cette région. Le deuxième critère est le fait que la ville de Yaoundé est la capitale du Cameroun, pays en voie de développement où de nombreux projets sont en cours de réalisation. D'une manière générale, le secteur de la construction des Bâtiments et Travaux Publics (BTP) connaît un développement considérable dans cette zone, entraînant une demande de plus en plus forte en granulats.

II.2.2 Choix des carrières

Trois carrières ont été identifiées et retenues suivant les critères suivants :

- La situation géographique (sites autour de la ville de Yaoundé),

- La notoriété sur le marché (quantités importantes de produits commercialisés),
- La diversité internationale (sites exploités par des entreprises de plusieurs nationalités).

Compte tenu de tous ces critères, les carrières retenues dans le cadre de cette étude sont : la carrière exploitée par l'entreprise Arab Contractor, celle exploitée par l'entreprise Gracam et celle exploitée par l'entreprise Razel.

La figure II.1 présente une vue globale aérienne de la localisation des trois sites de carrières d'emprunt des granulats par rapport à Yaoundé.

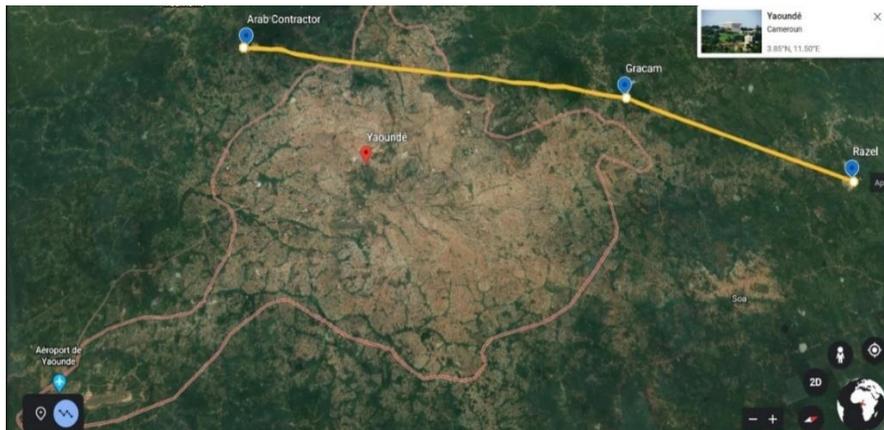


Figure II. 1: Vue aérienne d'ensemble de la localisation des trois carrières A G et R [Google Earth, 2020]

II.2.2.1 Carrière Arab Contractor

Arab Contractor (A) est une entreprise égyptienne installée au Cameroun depuis de nombreuses années. Elle exploite et produit des granulats concassés de plusieurs classes granulaires. Le site d'exploitation de la carrière est situé dans la zone de Simbock (Eloumbem I), au Sud-ouest de la ville de Yaoundé et à environ 30 km du centre urbain. Les graviers provenant de cette carrière seront notés GA et le sable issu de la même carrière SA. La figure II.2 présente l'image de la vue aérienne d'ensemble de la carrière Arab Contractor.



Figure II. 2: Vue aérienne d'ensemble de la carrière de Arab Contractor à Simbock [3°48'46"N11°26'03"E], [Google Earth, 2020]

II.2.2.2 Carrière Gracam

La société de Granulats du Cameroun, en abrégé GRACAM (noté G dans le cadre de ce travail) est une entreprise privée camerounaise implantée dans la localité de Nkolmekoknyom II, où elle exploite un gisement de gneiss. L'entreprise propose aujourd'hui une offre complète de matériaux (sables et graviers de plusieurs classes granulaires) destinés aussi bien au secteur industriel du BTP, que pour des particuliers [Granulats du Cameroun, 2019]. Les graviers provenant de cette carrière sont notés GG et le sable SG. La figure II.3 présente une vue aérienne d'ensemble de la localisation de la carrière Gracam.



Figure II. 3 : Vue aérienne d'ensemble de la carrière Gracam à Nkolodom [3°57'49''N11°30'28''E], [Google Earth, 2020]

II.2.2.3 Carrière Razel

Razel Fayat (R) est une entreprise française installée au Cameroun, et qui exploite depuis plusieurs années la roche massive sur un site qui s'étend sur 15 hectares. Elle alimente la capitale en granulats et commercialise environ 450 000 tonnes d'agrégats par an [Razel-Bec, 2019]. Les granulats issus de cette carrière sont essentiellement destinés à la fabrication de béton. Ce gisement est situé à Nkometou, à une vingtaine de kilomètres du centre urbain et situé au Nord de Yaoundé. Les graviers provenant de cette carrière sont notés GR et le sable SR. La figure II.4 présente une vue d'ensemble de la localisation de la carrière Razel.



Figure II. 4: Vue aérienne d'ensemble de la localisation de la carrière de Razel à Nkometou, [4°02'07"N11°33'59"E], [Google Earth, 2020]

II.2.3 Ciment

Sur le marché camerounais, les principaux ciments commercialisés pour la fabrication de bétons et mortiers sont : les ciments portland CPJ 35 (ciment essentiellement produit par l'entreprise nationale CIMENCAM), et les ciments portland CEM II 42.5R, produits et commercialisés par plusieurs sociétés nationales et internationales. Le ciment utilisé dans le cadre de cette thèse est un ciment CEM II/ B-P 42.5R de la société Dangoté. Ce choix est basé sur le fait que ce ciment est nouveau sur le marché camerounais et est un des ciments les plus utilisés actuellement. Le ciment Dangoté est un ciment portland de spécification technique CEM II/ B-P 42.5R et commercialisé dans des sacs de 50 kg. Ses propriétés seront détaillées dans le chapitre III et sa fiche technique est présentée en annexe.

II.2.4 Sable alluvionnaire de référence

Le sable de rivière utilisé dans le cadre de cette thèse est celui issu du fleuve Sanaga. La Sanaga est un fleuve qui mesure 918 km de long. Son bassin versant s'étend sur une superficie de 140 000 km² et couvre plus du quart du Cameroun [Ngoupayou et al., 2007]. C'est le sable couramment utilisé pour la fabrication du béton conventionnel à Yaoundé. Le sable issu du fleuve Sanaga est noté SS et sa classe granulaire est 0/5. La figure II.5 présente les images de quelques échantillons de sable issus des différentes carrières, ainsi que le sable de rivière.



Figure II. 5 : Images macroscopiques des sables SA, SS, SG et SR

II.2.5 Graviers

Afin d'avoir une continuité granulaire, et de mieux apprécier l'influence du type de sable sur les propriétés du béton, seuls les graviers de classe 5/15 de chacune des carrières ont été utilisés pour toutes les formulations. La figure II. 6 présente une image macroscopique d'un échantillon de graviers 5/15 utilisés.



Figure II. 6: Images macroscopiques de gravier 5/15

II.3 ESSAIS SUR LES MATIERES PREMIERES

Cette section est consacrée à la description du protocole expérimental de caractérisation des matériaux. Tous les échantillons de granulats destinés aux essais physiques et mécaniques ont préalablement été séchés dans une étuve réglée à la température de 105°C jusqu'à ce que la masse se stabilise (une différence de moins de 0,05% entre les deux pesées espacées de 24 h, avec une précision de 0,01 g).

II.3.1 Obtention de poudres de granulats

Le matériel utilisé pour le broyage des matériaux est un vibro-broyeur RETZSCH Mill RS 200 à disque. Le matériel est composé d'un bol et d'une garniture en tungstène tel que présenté en figure II. 7. Les échantillons sont introduits dans le bol avec la garniture. La garniture de broyage est fixée sur le plateau vibrant à l'aide d'un levier de serrage rapide. Le plateau avec la garniture de broyage effectue des vibrations circulaires horizontales. Du fait des mouvements de vibration, la garniture située dans le bol exerce des effets de pression, de percussion et de friction extrêmes sur l'échantillon à broyer. La poudre ainsi obtenue est constituée de grains dont les dimensions sont inférieures à 80 μm [RETZSCH, 2014]. Ces poudres vont nous servir à faire les essais d'analyse chimiques et minéralogiques ainsi que l'analyse thermogravimétrique.



Figure II. 7 : Vibro-broyeur RETZSCH Mill RS 200 : Emplacement du bol de broyage (a) ; Garniture en tungstène contenant un échantillon de sable réduit en poudre après broyage (b) au L2MGC

II.3.2 Granulats

Les essais pétrographiques et mécaniques sont réalisés sur les granulats des trois carrières A, G et R. Les essais physiques, chimiques et minéralogiques sont réalisés sur l'ensemble des granulats de carrière ainsi que sur le sable de rivière de Sanaga.

II.3.2.1 *Etude pétrographique*

L'étude pétrographique consiste à faire au préalable une première observation macroscopique des échantillons de roches des trois carrières. L'observation microscopique permet d'identifier visuellement les minéraux composant l'échantillon. L'essai est réalisé conformément à la norme [NF EN 12407, 2019]. Le microscope optique polarisant s'utilise comme le microscope optique, avec précaution, en observant toujours au plus faible grossissement pour faire les réglages importants (vis micrométrique) puis on grossit davantage si nécessaire, en effectuant les réglages mineurs à l'aide de la vis micrométrique. L'essai est réalisé sur des échantillons de granulats coupés en film d'épaisseur 500 à 600 micromètres collé sur une lame de verre. Une étape d'amincissement par polissage jusqu'à une épaisseur d'environ 30 μm est ensuite nécessaire avant l'observation microscopique. Le schéma de principe de du microscope optique polarisant est présenté sur la figure II.8. Une source lumineuse polarisée traverse les minéraux constitutifs de l'échantillon. L'échantillon à observer est placé entre deux filtres P (pour polariseur) et A (pour analyseur). Les rayons traversent un filtre qui ne se laisse traverser que par la lumière émise dans un plan de vibration précis (P). En traversant un minéral biréfringent, le rayon polarisant est divisé en deux rayons polarisés vibrant dans des directions orthogonales et à des vitesses différentes. Les observations faites dans ces conditions sont dites en Lumière Polarisée Non Analysée (LPNA). Elles concernent potentiellement la couleur, le pléochroïsme (faculté que possède un cristal d'absorber, en lumière polarisée, des longueurs d'onde), le relief, l'altération et les clivages des minéraux. L'essai est réalisé à l'aide d'un microscope optique pétrographique du laboratoire de géosciences de l'Université de Yaoundé I.

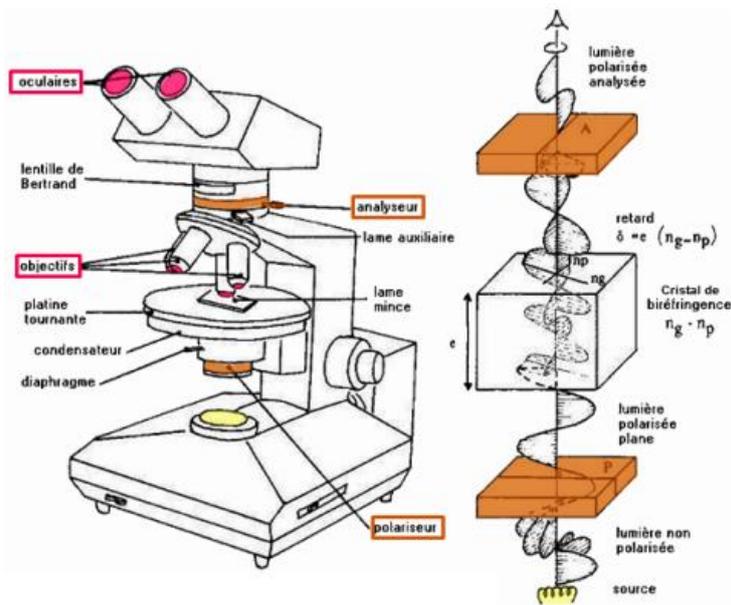


Figure II. 8 : Principe de biréfringence du microscope optique polarisant [DE VALONNE, 2002]

II.3.2.2 Analyse chimique

L'analyse chimique permet d'analyser et de quantifier la composition chimique présents dans le matériau. La composition chimique des granulats est réalisée par la Spectrométrie à Emission Optique couplée à l'ICP (ICP-OES), combinée à la Spectrométrie de Masse couplée à l'ICP (ICP-MS), selon la norme [DIN EN ISO 12677, 2013]. L'essai est réalisé sur des échantillons de sables et graviers broyés et passés au tamis de 80 μm . Les échantillons sont préalablement préparés par fusion avec du métaborate de lithium (LiBO_2), suivi par une dissolution par l'acide nitrique (HNO_3). L'analyse des éléments majeurs est faite par ICP-OES, et la détermination des autres éléments en trace par ICP-MS ; le contrôle qualité avec géostandards internationaux. Le principe de l'ICP-OES (figure II.9a) repose sur l'excitation thermique des ions dans le plasma et l'analyse de la lumière émise par ces ions excités. Chaque élément émet des longueurs d'onde caractéristiques. Les longueurs d'onde sont alors séparées, identifiées et leurs intensités mesurées par un spectromètre. La concentration élémentaire est ensuite déterminée par confrontation à une calibration externe. Le principe ICP-MS quant à lui repose quant à elle sur la séparation des ions générés par le plasma d'argon en fonction de leur rapport masse sur charge m/z . Les ions ainsi séparés sont alors identifiés et comptabilisés, ce qui permet un calcul des concentrations élémentaires présentes dans le matériau par l'intermédiaire d'une calibration externe. La Spectrométrie de Masse couplée à l'ICP offre une sensibilité extrêmement élevée (et ainsi, des seuils de détection très bas) pour un large éventail d'éléments [Spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-OES/MS), analyse ICP," 2019].

Les tests sont effectués au laboratoire de spectrochimie du Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du Centre de Recherche Pétrographique et Géotechnique (CRPG) à Nancy.

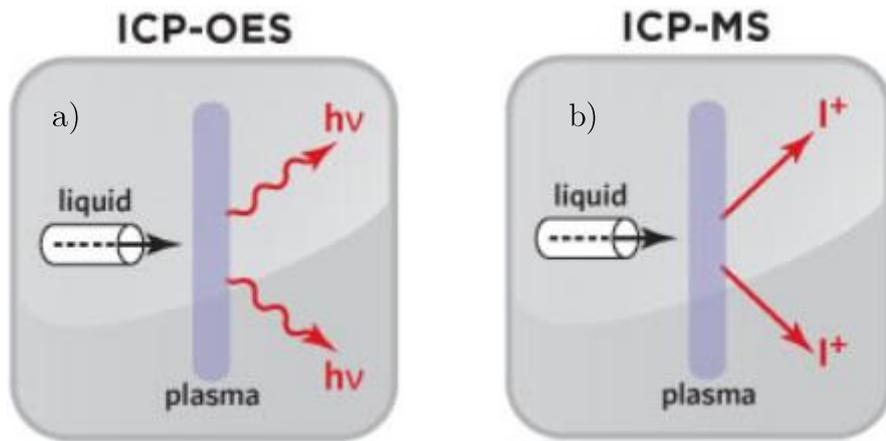


Figure II. 9 : Principe ICP-OES (a) et ICP-MS (b) [Spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-OES/MS), analyse ICP, 2020]

II.3.2.3 Analyse minéralogique

Afin de définir avec précision la nature des différentes phases cristallines et amorphes présentes dans les échantillons de granulats, des analyses minéralogiques par diffraction aux rayons X (DRX) sont réalisées. Les granulats sont broyés puis passés au tamis de 80 μm . Les analyses sont effectuées à l'aide d'un diffractomètre de chez Bruker AXS D8 Advance, en géométrie θ - θ , équipé d'une source de cobalt ($\lambda = 1,79 \text{ \AA}$), sans monochromateur et d'un détecteur rapide lynx Eye dont l'image est présentée sur la figure II.10. L'essai est réalisé au Laboratoire Sol Roches et Ouvrages Géotechniques (SRO) de l'université Gustave Eiffel à Marne-la-Vallée. L'identification a été réalisée à l'aide d'un logiciel EVA couplé à la base de données minéralogiques ICDD Pdf2. Les analyses quantitatives ont été effectuées avec le logiciel TOPAS (Rietveld Analysis). L'essai est réalisé conformément à la norme [NF EN 15305, 2009].

Le principe de la DRX consiste à faire diffracter les rayons X sur un échantillon solide ou pulvérulent.

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'onde (de 0,1 à 10 \AA). Les cristaux constituent des réseaux naturels dont les intervalles caractéristiques (intervalles entre plans réticulaires) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X. En conséquence, les rayons X sont diffractés par les cristaux comme la lumière l'est par les réseaux et donnent des phénomènes d'interférences identiques. Les conditions de diffraction d'un rayonnement X sont régies la loi de Bragg lorsqu'il existe une organisation des atomes dans le solide suivant des plans cristallins.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{Eq. II. 1})$$

où :

- n : nombre entier désignant l'ordre de réflexion,
- λ : longueur d'onde du rayonnement X (m),
- d : distance entre les plans réticulaires d'une même famille (m),
- θ : angle de diffraction.



Figure II. 10: vue d'ensemble du dispositif d'analyse DRX de chez Bruker AXS D8 au laboratoire SRO

II.3.2.4 Caractérisation physique

Dans ce paragraphe, nous présentons les protocoles de caractérisation des paramètres physiques des granulats. Nous nous sommes intéressés notamment à la granulométrie, au module de finesse, au taux de particules fines, à l'équivalent de sable, aux différentes masses volumiques et au coefficient d'absorption d'eau des granulats.

II.3.2.4.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des granulats (graviers et sables) est réalisée conformément aux normes [NF EN 933-1, 1997, XP P18-545 2008]. L'analyse granulaire s'est effectuée en deux temps :

- Une première étape est le tamisage mécanique à l'aide d'une colonne montée sur une source vibrante pendant approximativement 5 minutes,
- La seconde phase (finition) est réalisée manuellement au niveau de chaque tamis de la série afin d'affiner l'analyse granulométrique.

Le tamisage est arrêté lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations. L'exploitation des résultats est présentée sur des courbes granulométriques tracées de manière continue dans un repère semilogarithmique, en portant les ouvertures des tamis en abscisse, et les pourcentages de passant en ordonnée. Les essais sont réalisés sur des échantillons de 4 kg pour les sables et de 5 kg pour les graviers. Pour chaque mélange, des coefficients d'uniformité (C_u) et de continuité (C_c) [Hafid, 2012] ont été calculés par les formules suivantes :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (Eq. II. 2)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (Eq. II. 3)$$

où D_x désigne la taille de grains qui correspond à un tamisat égal à $x\%$.

avec :

$$\begin{cases} Cu > 2 \rightarrow \textit{granulométrie étalée} \\ Cu < 2 \rightarrow \textit{granulométrie uniforme ou serée} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Cc < 3 \rightarrow \textit{matériau bien gradué} \\ Cc > 3 \rightarrow \textit{matériau mal gradué} \end{cases}$$

II.3.2.4.2 Masse volumique apparente et absolue

Les masses volumiques sont définies pour les granulats selon le mode opératoire décrit dans la norme [NF EN 1097, 2006]. Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont déterminées sur des échantillons de matériaux passés à l'étuve de 105°C jusqu'à masse constante.

II.3.2.4.3 Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau est le rapport de la masse après immersion de l'échantillon pendant 48h dans l'eau à une température de 22°C, à la masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C. L'essai est réalisé suivant le mode opératoire décrit dans la norme [NF EN 1097-6, 2001]. La connaissance de ce coefficient permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. Il est obtenu par la formule suivante :

$$W_a = 100 \times \frac{M_e}{M_s} \quad (\text{Eq. II. 4})$$

où :

- M_e désigne la masse d'eau absorbée ;
- M_s la masse de l'échantillon après passage à l'étude à 105°C.

II.3.2.4.4 Equivalent de sable

La propreté du sable est déterminée par l'essai d'équivalent de sable (ES). L'essai est réalisé sur des échantillons de sables selon les normes [NF P 18-598, 1991; NF P 18-592, 1991]. Le principe est de séparer les particules fines contenues dans le sable et d'estimer le rapport entre les hauteurs du flocculat (proportion de fines par rapport au reste de l'échantillon (cf. Eq II.6)). La figure II.11 présente la phase de réalisation de l'essai en laboratoire. L'équivalent de sable est obtenu par la formule suivante :

$$ES = 100 \times \frac{H_2}{H_1} \quad (\text{Eq. II. 5})$$

Où : H_1 est la hauteur du sable propre + les éléments fins

H_2 est la hauteur du sable propre uniquement.



Figure II. 11: Image de la réalisation de l'essai d'équivalent de sable au L2MGC.

II.3.2.4.1 Compacité expérimentale des différents granulats

La mesure de la compacité des granulats a été déterminée par l'équation Eq. II.6, à partir de la masse volumique du matériau dans un cylindre métallique posé sur une table vibrante, suivant le protocole décrit par [Sedran et al., 1994].

$$\Phi = 1000 \times \frac{M_s}{0,25 \rho \pi D^2 H} \quad (Eq. II. 6)$$

Où :

- M_s : masse de l'échantillon soumis à l'essai (kg),
- D : diamètre du cylindre (m),
- H : hauteur de l'échantillon (m),
- ρ : masse volumique réelle du matériau utilisé (kg/m³).

II.3.2.5 Dureté des graviers

La caractérisation mécanique des granulats est déterminée par l'essai d'abrasion au choc : essai Los Angeles, afin de s'assurer de la dureté des graviers. L'essai est réalisé sur des échantillons de classe 6/10 extraits des graviers 5/15 des trois carrières suivant le principe est décrit dans la norme [P18-573, 1990]. L'essai a été réalisé au laboratoire Granulats et Procédés d'Elaboration des matériaux (GPEM) de l'université Gustave Eiffel, Campus de Nantes.

II.3.3 Ciment

Afin de compléter les informations contenues dans la fiche technique du ciment, des essais de composition chimique et de caractérisation minéralogique par DRX ont été réalisés sur des échantillons de poudre du ciment.

II.3.3.1 Composition chimique

La composition chimique du ciment a été réalisée par spectrofluorescence X sur un spectromètre ICP-OES selon la norme [DIN EN ISO 12677, 2013] sur des échantillons broyés puis passés au tamis de 80 μm au laboratoire SARM de Nancy.

II.3.3.2 Composition minéralogique

Afin de définir avec précision la nature minéralogique des phases présentes dans le ciment, des essais d'analyse minéralogique ont été déterminées par DRX sur échantillons broyés et passés au tamis de 80 μm au laboratoire SRO de l'université Gustave Eiffel à Marne-la-Vallée.

II.4 FORMULATIONS DES BETONS ET MORTIERS

II.4.1 Données de base

Avant de procéder à la formulation et à la confection des éprouvettes de bétons par la méthode de Dreux-Gorisse, les principales hypothèses suivantes sont choisies :

- La classe de résistance à la compression du béton est C25/30, pour la résistance à la compression caractéristique à 28 jours $f_{c28}=25$ MPa ;
- Le dosage en ciment est le même pour toutes les formulations et est égale à $350\text{Kg}/\text{m}^3$;
- Le rapport E/C est identique pour toutes les formulations ($E/C=0,6$) ;
- Classe de consistance S2 (affaissement au cône d'Abrams de 8cm).

II.4.2 Formulations de bétons

II.4.2.1 Composition

Pour mieux étudier l'influence du sable de concassage sur les propriétés du béton, la méthodologie adoptée consiste à formuler des bétons en remplaçant le sable de rivière par le sable concassé (de chacune des trois carrières) dans les proportions volumiques suivantes : 100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 50 % et 0 %, et en utilisant les graviers 5/15 de la carrière de provenance du sable de concassage. La méthode de formulation utilisée est celle de Dreux Gorisse [Méthode de Dreux Gorisse, 1998]. Le principe consiste à déterminer les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis en hypothèse, de la nature et des caractéristiques des granulats Deux campagnes de confection des éprouvettes de bétons ont été menées dans le cadre de cette thèse. Toutes les formulations ont été déterminées à partir des courbes granulométriques des mélanges.

Campagne 1 : Réalisée au laboratoire de mécanique, des matériaux, de structure et de productique (LMMSP) de l'Université de Yaoundé I, elle a consisté à confectionner des éprouvettes de béton en combinant le sable de concassage au sable de rivière dans les proportions suivantes (par rapport au sable de concassage) : (100 % - 0 %), (90% - 10 %), (80% - 20 %), (70% - 30%), (50% - 50%) et (0 % - 100%). Un total de 18 formulations (à raison de 6 formulations par carrière) de bétons ont été réalisées. Un total de 270 éprouvettes cylindriques 16x32 cm ont été confectionnés pour les essais de résistance à

compression et de traction par fendage à 7j, 21j et 28j. Un total de 18 éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm ont été confectionnés pour les essais de retrait de séchage au jeune âge.

Campagne 2 : Réalisée au laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil (L2MGC) de CY Cergy Paris Université, elle a consisté à confectionner des éprouvettes de béton en combinant le sable de concassage au sable de rivière dans les proportions suivantes (par rapport au sable de concassage) : (50% - 50%) et (0 % - 100%). Pour chaque formulation, 3 éprouvettes cylindriques 11x22 cm ont été confectionnées pour la réalisation des essais de résistance à la compression à 90 jours de durcissement, et la détermination du module statique de Young. Un total de 6 éprouvettes cylindriques 15x30 cm ont été confectionnés pour la réalisation des essais de perméabilité au gaz, de porosité accessible à l'eau, de transfert thermique et de densité.

II.4.2.2 Malaxage

Le malaxage du béton a été réalisé conformément à la norme [NF P18- 404], en respectant les consignes suivantes :

- Mouillage préalable du malaxeur, dans le but de limiter une absorption de l'eau de gâchage,
- Introduction des matériaux dans la cuve du malaxeur de manière à éviter l'expansion du ciment,
- Malaxage des matériaux à sec pendant 1 minute,
- Ajout progressif d'eau
- Malaxage pendant 2-3 minutes.

II.4.2.3 Remplissage et conservation des éprouvettes

Le remplissage et la conservation des éprouvettes de béton ont été réalisés conformément à la norme [NF P18- 404] :

- Les moules métalliques de 160x320 mm sont préalablement lubrifiés (pour faciliter le démoulage), remplis en deux couches et vibrés par piquetages pour les éprouvettes de la campagne 1. Lors de la campagne 2, les moules 110x220 mm et ceux 150x300 mm en carton sont utilisés.
- Les moules sont arasés et lissés après la deuxième phase de vibration,
- Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans leurs moules en laboratoire pendant 24 heures, dans le but d'éviter toute dessiccation rapide,
- Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et immergées dans des bacs d'eau à une température de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ jusqu'à la date des essais.

Les images de la figure II.12 présentent le malaxeur, les moules remplis de béton et le processus de démoulage des éprouvettes pour la campagne 1. Les images de la figure II.13

montrent les phases de conservation des éprouvettes dans les laboratoires LMMSP et L2MGC.



Figure II. 12 : Malaxeur (a), confection des éprouvettes (b), démoulage des éprouvettes (c) au LMMSP (Campagne 1)

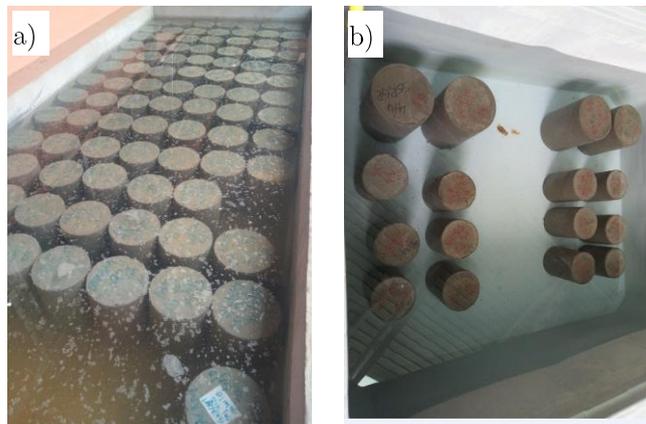


Figure II. 13 : Conservation des éprouvettes au LMMSP (a) et au L2MGC (b) (Campagne 2)

II.4.3 Formulation des mortiers de bétons équivalents

Dans le but de mieux apprécier l'influence du sable de concassage sur les propriétés du béton, et de limiter les essais à réaliser directement sur le béton, une campagne de formulation de mortiers de bétons équivalents (MBE) a été menée. La méthode MBE consiste à concevoir, à partir d'une composition donnée de béton, un mortier de béton équivalent en remplaçant le squelette granulaire de la matrice de formulation du béton par le sable, tout en conservant le même volume de pâte cimentaire [Yang and Lee, 2017]. Le principe est basé sur l'existence d'une corrélation simple entre les propriétés rhéologiques du béton et celles du mortier qui le compose [Schwartzentruber et Catherine, 2000].

Dans cette campagne, nous nous sommes limités aux formulations des mélanges de sable de concassage et sable de rivière dans les proportions suivantes : (100 % - 0 %), (50 % - 50 %) et (0 % -100 %).

Les échantillons prismatiques de mortier de 40 x 40 x 160 mm ont été fabriqués conformément à la norme [EN 196-1]. Le mélange a été réalisé en utilisant un malaxeur automatique Perrier haute performance. Les moules 40 x 40 x 160 mm sont remplis en deux couches, puis fixés et vibrés sur l'appareil à chocs à raison de 60 chocs en 60 secondes pour chaque phase de remplissage.

Les échantillons ont par la suite été testés après un durcissement par immersion dans l'eau jusqu'à la date de l'essai. La figure II. 14 présente les images du malaxeur, de la phase de compactage à la table à choc, ainsi que des éprouvettes démoulées le lendemain de la confection.

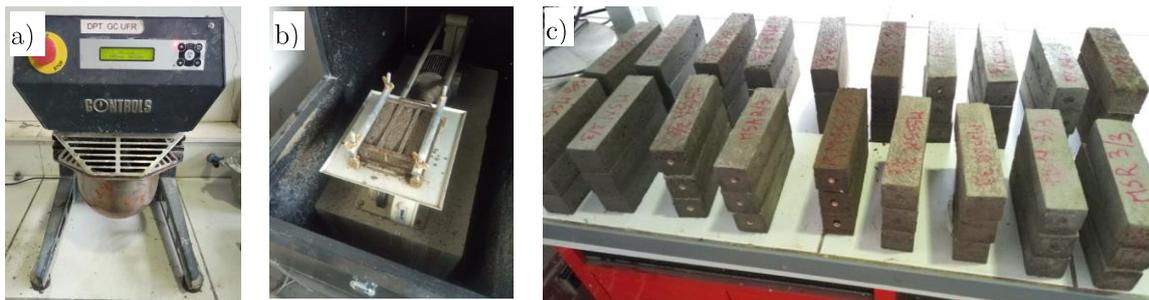


Figure II. 14: Malaxeur à mortier (a) ; Table à choc (b) ; Eprouvettes de mortier (c)

II.5 PHASE DE CARACTERISATION DES MATERIAUX CIMENTERAIRES

Dans cette section, nous présentons les protocoles et normes utilisés pour la caractérisation des bétons et mortiers. Nous présentons aussi les principaux appareils utilisés pour la réalisation des essais.

II.5.1 Caractérisation du béton à l'état frais

II.5.1.1 *Essai de maniabilité*

La maniabilité des bétons a été déterminée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. La mise en œuvre de l'essai suit le protocole décrit dans la norme [NF P18-451, 1999]. L'objectif est de déterminer la consistance d'un béton frais. La figure II. 15 présente une phase de mesure de l'affaissement en laboratoire.



Figure II. 15 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams au LMMSP

II.5.1.2 Essai d'étalement à la table à secousses

La mesure de l'ouvrabilité du béton frais est réalisée par l'essai d'étalement à la table à secousses. L'essai a été réalisé conformément à la norme [NF EN 12350-5, 2006]. Le béton est mis en place dans le moule tronconique en 2 couches et vibré à l'aide d'une tige de piquage à raison de 10 coups par couche. Le béton est par la suite démoulé puis il reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre initial (D_i) et le diamètre final (D_r) de la galette obtenue. Le principe de mesure de l'étalement est schématisé par la figure II.16a. La figure II. 16b présente une phase de mesure de l'étalement au laboratoire. La valeur de l'étalement est donnée par la formule :

$$E(mm) = \frac{D_r - D_i}{2} \quad (Eq. II. 7)$$

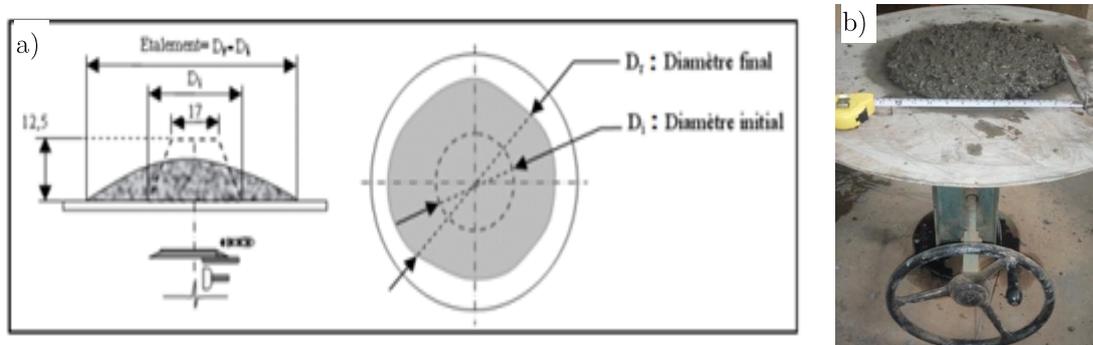


Figure II. 16 : Schématisation du principe de mesure de l'étalement à la table à secousses (a) [ASTM C 124,1971], mesure de l'étalement du béton à la table à secousses au LMMSP (b)

II.5.2 Caractérisation du béton à l'état durci

II.5.2.1 Essai de résistance en compression

L'essai de résistance à la compression a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur aux âges de 7j, 21j et 28j, sur une presse de type PERRIER, de capacité maximale de 2000 kN (campagne 1). Les essais sont réalisés avec des éprouvettes cylindriques de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur sur une presse hydraulique d'une capacité de 3000 kN et à une vitesse de déplacement de 0,5 MPa/s pour les mesures de résistance à la compression à 90 jours, (campagne 2) conformément aux normes [NF P18 406 ; EN 12390-3]. Pour chaque essai, trois éprouvettes sont utilisées afin d'estimer une valeur moyenne.

II.5.2.2 Essai de résistance à la traction

L'essai de traction par fendage est réalisé conformément aux normes [NF P18 408; EN 12390-6] avec la presse PERRIER sur des éprouvettes cylindriques de 160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur. . Trois éprouvettes sont utilisées pour chaque essai. Si P est la charge de la compression maximale entraînant la rupture du cylindre, la résistance à la traction par fendage est donnée par la relation :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \quad (\text{Eq. II. 8})$$

Avec :

- P : charge de la compression maximale (N),
- j : âge du béton (en jours, au moment de l'essai),
- D : diamètre du cylindre (m),
- L : hauteur du cylindre (m).

La figure II. 17 présente les phases de réalisation des essais de compression et de traction par fendage sur éprouvettes de béton en laboratoire réalisés avec la presse PERRIER.



Figure II. 17 : Appareil d'essai de réalisation de la compression et de la traction par fendage au LMMS

II.5.2.3 Détermination du module de Young

Pour l'analyse des modules statiques, des échantillons cylindriques de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur ont été utilisés. Une presse hydraulique d'une capacité de 3000 kN et d'une vitesse de déplacement de 0,5 MPa/s a été utilisée pour l'essai de compression, conformément à la norme NF EN 12390-3 [NF EN 12390-3, 2019]. L'essai réalisé est un essai cyclique avec un maximum de 30% de charge à la rupture. Les éprouvettes de béton sont instrumentées par un ensemble de quatre jauges de déformation placées sur la surface latérale et à mi-hauteur de l'éprouvette. Deux jauges sont placées longitudinalement et les deux autres sont fixées horizontalement. Ces jauges sont deux à deux diamétralement opposées et sont reliées à une centrale d'acquisition permettant d'enregistrer les déformations toutes les 0,001s. Grâce à la centrale interne de la presse hydraulique, l'évolution de la contrainte de compression est obtenue. Le tracé de la courbe contrainte/déformation permet ainsi de déterminer le module de Young. L'essai est également réalisé sur trois éprouvettes de chaque formulation de béton. Le système de l'unité de réalisation de l'essai ainsi qu'une image d'une éprouvette sur laquelle sont collées les jauges sont présentés en figure II. 18.

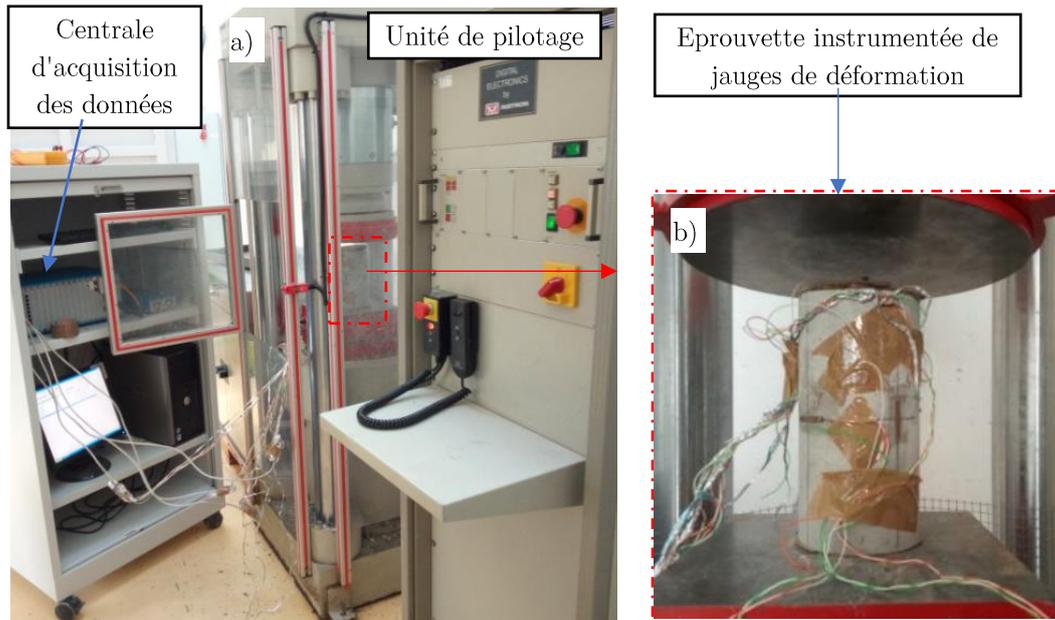


Figure II. 18 : Unité de pilotage de la presse et d'acquisition des données (a) ; Échantillon de béton avec des jauges de déformation lors d'un test en compression (b) eu L2MGC

II.5.2.4 Essai de détermination de la masse volumique du béton durci

La mesure de la densité est effectuée après 28 jours de conservation en immersion à $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Une série de 3 échantillons cylindriques de 50 x 150 mm sont retirés de l'eau de stockage puis placés dans un four à une température de 105°C jusqu'à ce que la masse se stabilise (différence de moins de 0,05% entre deux pesées espacées de 24 h, avec une précision de 0,01 g). Les essais de densité sont effectués conformément à la norme [ASTM C 642-13] et la valeur de la densité est calculée selon

$$\rho_c = 100 \times \frac{A}{C - D} \quad (\text{Eq. II. 9})$$

Avec

- A : la masse (g) de l'échantillon séché au four dans l'air ;
- C : la masse (g) de l'échantillon saturé séché en surface dans l'air ;
- D : la masse (g) de l'échantillon dans l'eau après immersion.

II.5.2.6 Essai de perméabilité au gaz

La perméabilité aux gaz des différents bétons K_{gaz} (m^2) est mesurée à l'aide de la méthode Cembureau [Abbas et al., 1999]. L'essai consiste à mesurer en régime permanent le débit de gaz Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) sortant d'une éprouvette cylindrique à la pression atmosphérique P_0 (Pa), sous l'effet d'une pression P_{adm} (Pa) appliquée en entrée. La face latérale de l'éprouvette est protégée vis-à-vis des échanges gazeux. Cela assure un écoulement unidirectionnel du gaz.

Pour chaque formulation, des mesures ont été effectuées sur trois disques de 50 mm d'épaisseur et de 150 mm de diamètre après 28 jours de durcissement dans l'eau, les échantillons ont été séchés dans un four ventilé à une température de 80°C jusqu'à stabilisation de la masse tel que défini par [Kollek, 1989]. La perméabilité apparente est alors calculée à partir d'une équation (1), combinant la loi de Darcy et l'équation de Hagen-Poiseuille, qui suppose que le flux est laminaire, le fluide compressible et le régime permanent.

$$K_{gas} = \frac{2 \cdot P_0 \cdot Q \cdot L \mu}{A \cdot (P_{adm}^2 - P_0^2)} \quad (Eq. II. 10)$$

Avec :

Q : débit volumique du fluide (m³/s), L : épaisseur de l'échantillon (m), A : surface de la section transversale de l'échantillon (m²), μ viscosité dynamique du fluide (Azote) à 20°C, (Pa.s), P_{atm} : pression atmosphérique, P : pression d'entrée (Pa).

Ayant des *perméabilités au gaz différentes* pour différentes pressions d'entrée, la perméabilité intrinsèque du béton est ensuite calculée en utilisant la méthode de Klinkenberg [Zhang and Li, 2019]:

$$K = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \quad (Eq. II. 11)$$

$$P_m = \frac{P_0 + P_{atm}}{2} \quad (Eq. II. 12)$$

Où:

- P_0 : pression atmosphérique (Pa),
- β : constante de Klinkenberg ;
- K_{int} : la pente de la ligne de Klinkenberg,
- P_m est la pression moyenne.

La figure II. 19 présente le perméamètre Cembureau utilisé pour la détermination de la perméabilité à gaz des bétons.

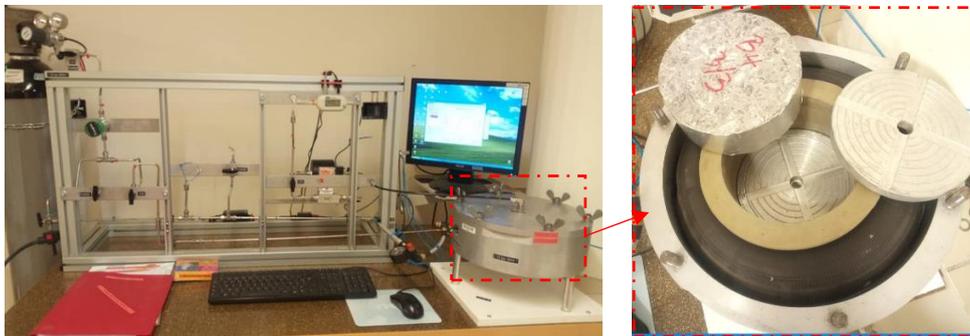


Figure II. 19: Perméamètre Cembureau de mesure de la perméabilité à gaz (L2MGC).

II.5.2.7 Essai de détermination des propriétés thermiques

La connaissance des propriétés thermiques telles que la conductivité thermique, la diffusivité et la capacité thermique des bétons et mortiers est primordiale lors de l'étude de leur comportement en termes de consommation énergétique du bâtiment.

Afin de mesurer ces paramètres, le dispositif Hot-Disk TPS 1500 de chez Thermo-concept est utilisé. Le principe de fonctionnement est basé sur la méthode TPS (source plane transitoire). Le dispositif est composé d'une centrale d'acquisition à laquelle est reliée une sonde Hot-Disk et est piloté par un ordinateur qui comprend un logiciel de traitement des données Hot Disk Thermal Constants Analyser. Dans le cadre de cette étude, l'essai est réalisé à température ambiante et une sonde « kapton » de rayon 10 mm est utilisée. Pour chaque formulation, trois mesures sont effectuées sur deux disques de 50 mm d'épaisseur et de 150 mm de diamètre après 28 jours de durcissement dans l'eau. Les échantillons ont été préalablement séchés dans un four ventilé à une température de 80°C jusqu'à stabilisation de la masse. La sonde est mise en sandwich entre les deux échantillons de béton. La figure II. 20 présente le dispositif hot-Disk de mesure en laboratoire des caractéristiques thermiques du béton.

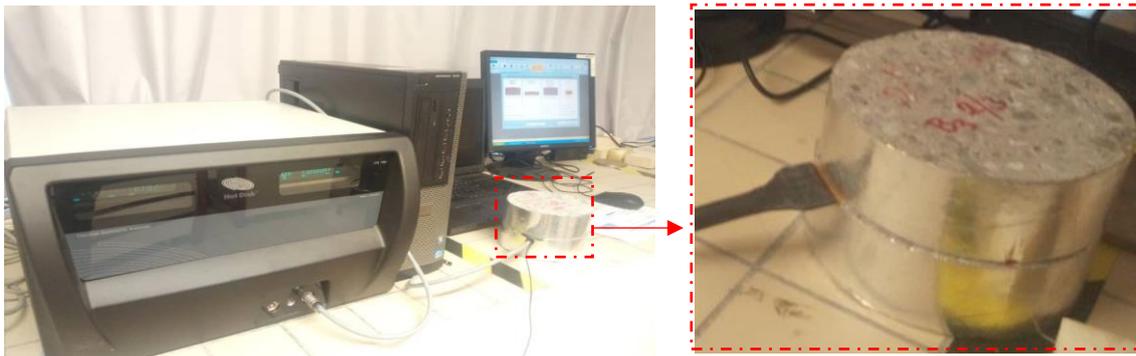


Figure II. 20: Appareillage du dispositif Hot-Disk TPS 1500 au L2MGC

Après les mesures, le logiciel intègre un algorithme et dispose d'une interface qui permet d'évaluer :

- La conductivité thermique « λ » exprimée en $W/m \cdot ^\circ K$, valeur mesurée,
- La capacité thermique « C_p », exprimée en $MJ/M^3 \cdot ^\circ K$, valeur mesurée,
- La diffusivité thermique « a », exprimée en mm^2/s , valeur calculée.

II.5.3 Essai de détermination de la résistance à la compression et à la flexion sur mortier

Les résistances mécaniques sont déterminées d'après la norme [NF EN 12190 1998] sur des éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160$ mm. Les essais de compression et de flexion sont réalisés aux échéances de 28 et 90 jours sur une presse 3R avec chargement effectué à la vitesse constante de 0.5 KN/s jusqu'à la rupture. Trois échantillons pour chaque

mortier sont testés. La figure II. 21 présente une image de la presse 3R utilisée pour les essais de compression et de flexion 3 points.



Figure II. 21: Presse 3R pour essais de compression et de flexion 3 points au L2MGC

II.5.4 Essais de Détermination des propriétés relatives à la durabilité

II.5.4.1 Mesure de la masse volumique et de la porosité accessible à l'eau

La masse volumique et le test de porosité accessible à l'eau sont effectués à 28 jours de durcissement sur des échantillons de béton et mortier conformément à la norme [NF P18-459, 2010].

La mise sous vide des échantillons à une pression inférieure à 25 mbar est réalisée à l'aide d'une pompe à palette et d'une cloche sous vide. Cette pression est maintenue pendant 3 heures. Par la suite, l'imprégnation d'eau se fait toujours sous vide via un conduit d'eau relié à la cloche sous vide. Un dégazage de l'eau est fait pour s'assurer du maintien de vide lors de la connexion entre la cloche sous vide contenant les échantillons et une fiole contenant l'eau. Le dégazage permet aussi d'évacuer les bulles d'air en suspension dans l'eau. La pression est maintenue pendant plus de 44 heures. La porosité et la densité des matériaux sont alors calculées comme suit :

$$\theta = 100 \times \frac{M_{Sat} - M_{Sec}}{M_{Sat} - M_{Imm}} \quad (Eq. II. 13)$$

$$\rho = \frac{M_{Sec}}{M_{Sat} - M_{Imm}} \times \rho_{eau} \quad (Eq. II. 14)$$

Avec:

- M_{Sat} : la masse (g) de l'échantillon saturé dans l'air ;
- M_{Sec} : la masse (g) de l'échantillon séché à la température souhaitée;
- M_{Imm} : la masse (g) de l'échantillon saturé sous l'eau.

La figure II. 22 présente l'appareillage permettant de mesurer la porosité accessible à l'eau sous vide.



Figure II. 22: Appareillage de mesure de la porosité à l'eau sous vide (L2MGC).

II.5.4.2 Mesure du retrait et perte de masse

Le retrait correspond à une diminution apparente du volume de béton. La mesure du retrait de séchage a été effectuée sur des éprouvettes prismatiques de béton 70 x 70 x 280 mm et sur des éprouvettes prismatiques de mortier 40 x 40 x 160 mm coulées dans des moules sur lesquels sont vissés des plots de stabilisation des éprouvettes au retrecimètre. L'essai a démarré 24 heures après la confection, dans des conditions climatiques à $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ HR et selon les conditions décrites dans la norme [NF P 18-427]. La figure II. 23 présente un retractomètre à mortier ainsi qu'un moule 40x40x140 mm sur lequel sont vissés des plots de stabilisation. Les mesures sont faites sur une période de 28 jours. A chaque mesure, la perte de masse correspondante est également déterminée avec la formule suivante :

$$\Delta M = 100 \times \frac{M_0 - M_t}{M_0} \quad (\text{Eq. II. 15})$$

Avec :

- M_0 : la masse initiale de l'éprouvette (g) ;
- M_t : la masse de l'éprouvette le jour de la mesure (g).

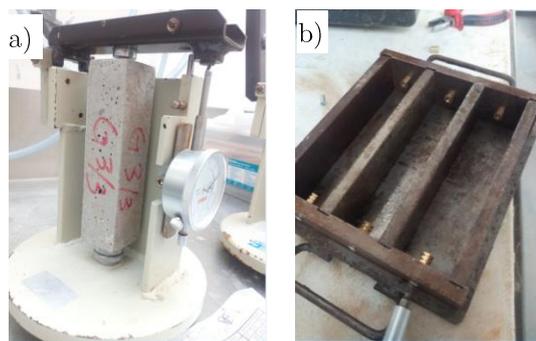


Figure II. 23 : Retractable mortier (a) et moule équipé de plots (b) au L2MGC

II.5.4.3 Carbonatation accélérée

L'essai de carbonatation accélérée consiste à exposer les échantillons de mortier à des teneurs en dioxyde de carbone (CO_2) de 3% dans une enceinte à humidité relative égale à 65% et température contrôlée de 20°C . L'ensemble du dispositif est placé dans une salle

de laboratoire dont la température est maintenue à $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$. La figure II. 24 présente une image de l'enceinte de carbonatation utilisée.



Figure II. 24: Présentation de l'enceinte de carbonatation accélérée au L2MGC

Après une cure humide de 28 jours, les échantillons sont séchés pendant 14 jours dans une étuve à 45°C et 50% d'humidité relative (pour réduire à présence de l'eau libre qui pourrait influencer la carbonatation). Le principe de cet essai a consisté à introduire les échantillons de mortier dans l'enceinte de carbonatation. Aux échéances de 7 j, 14 j, 28 j et 90 j, les échantillons sont retirés de l'enceinte, puis à partir du fendage d'une éprouvette pour chaque formulation, la profondeur de carbonatation est mesurée sur les fractures fraîches à l'aide d'un indicateur coloré : la phénolphtaléine. Une éprouvette témoin avait préalablement été cassé et imbibée de phénolphtaléine, puis placée dans une salle climatisée à 20°C et 23 % pour comparer l'évolution de la profondeur de carbonatation avec les éprouvettes exposées dans l'enceinte. L'essai est réalisé sur des éprouvettes de mortier $40 \times 40 \times 160$ mm pour les pourcentages de substitution de 100%-0%, 50%-50% et 0%-100%. Pour chaque formulation, une éprouvette a été cassée en flexion le jour de l'essai et imbibée ensuite de phénolphtaléine.

II.5.5.4 Attaque chimique aux ions chlorures et ions sulfates

Beaucoup d'ouvrages sont exposés aux milieux plus ou moins agressifs, provoquant des dégradations considérables et une réduction de la durée de vie de l'ouvrage. Ces agressions sont principalement dues à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation de gypse ou d'ettringite secondaires expansives, conduisant à des dégradations telles que la chute de résistance, les fissurations et les déformations de matériaux [Zaamouki, 2016].

Les essais de résistance aux attaques chimiques sont réalisés par exposition des éprouvettes prismatiques de mortier $40 \times 40 \times 160$ mm par immersion dans des solutions

agressives d'acide chloridrique (HCl) et de sulfate de sodium (Na₂SO₄) toutes dosées à 5% en volume. Les éprouvettes sont conservées dans des bacs (résistants aux acides) pendant une durée de 250 jours. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouverts d'au moins 2 cm de solution acide conformément aux recommandations de la norme [ASTM C 267]. Les éprouvettes sont régulièrement sorties des solutions et séchées à température ambiante pendant 10 min (afin d'éliminer l'excès d'eau de la surface). Des mesures de l'évolution de masse sont effectuées pendant la période d'exposition. Les images de la figure II.25 présentent le mode de conservation des éprouvettes, ainsi qu'une phase de séchage des éprouvettes avant prise de masse.

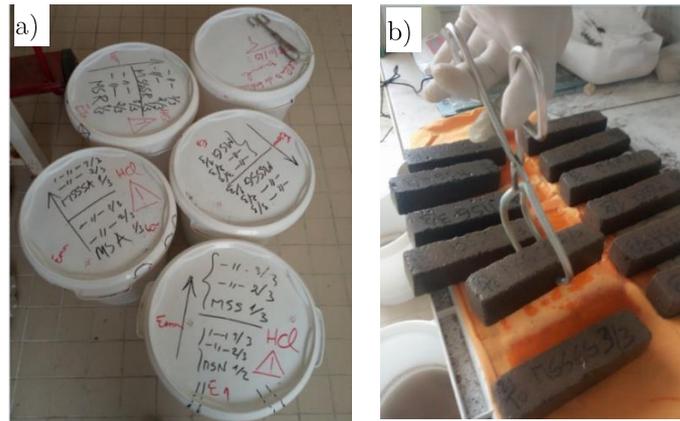


Figure II. 25: Conservation des éprouvettes (a) et opération de mesure des masses (b) au L2MGC

Au bout de 28 jours et 90 jours d'exposition, certaines éprouvettes (2 par formulation) ont subi des essais de compression et de flexion 3 points en vue de comparer les résultats avec ceux des éprouvettes témoins (conservés dans de l'eau).

La variation de masse de chaque éprouvette est calculée à partir de la formule suivante :

$$\Delta M = 100 \times \frac{M_0 - M_t}{M_0} \quad (\text{Eq. II. 16})$$

Avec :

M_0 : la masse de l'éprouvette avant exposition (g),

M_t : la masse de l'éprouvette le jour de la mesure (g).

II.5.5.5 Absorption d'eau par capillarité

L'objectif de cette section est de faire une analyse comparative des caractéristiques hydriques des mortiers et bétons formulés avec 50% de sable de concassage et ceux formulés uniquement de sable de rivière. L'essai d'absorption par capillarité consiste à déterminer la masse d'eau absorbée par remontée capillaire au sein d'un béton ou mortier. Pour cet essai, il n'existe pas encore de norme spécifique pour les mortiers et bétons de structure. La masse d'eau absorbée a été déterminée par différentes pesées entre la masse initiale et la masse à l'échéance. L'essai est basé sur le principe d'absorption d'eau par succion et de manière unidirectionnelle. Afin de bloquer tout échange hydrique avec l'air

extérieur, les surfaces latérales des échantillons ont été recouvertes par un papier film autocollant. La masse de l'eau absorbée a été déterminée par différence de pesées entre la masse initiale et la masse aux échéances. Les prises ont été faites aux temps suivants : 20 s, 20 mn, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 14 h, 24 h, 2 j, 3 j, 4 j, 5 j, et 7 j. La figure II. 26 présente les images des échantillons de mortier testés ;



Figure II. 26 : Image de réalisation des essais de capillarité des échantillons de mortier

$$CA_{cap}(t) = \frac{m_t - m_i}{A} (g / cm^2) \quad (Eq. II. 17)$$

Avec :

- m_i : la masse de l'éprouvette avant exposition (g) ;
- m_t : la masse de l'éprouvette au temps t de la mesure (g) ;
- A est la section de l'éprouvette (cm²).

II.5.5 Caractérisation microstructurale

L'objectif de l'analyse microstructurale est d'améliorer la compréhension des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons et mortiers. Cette section est consacrée à l'observation du réseau poreux, de la microfissuration à l'interaction pâte/granulat et de la cartographie chimique du silicium et du calcium dans les échantillons de mortier. L'objectif est de mieux apprécier l'effet des composés chimiques du sable de concassage sur la microstructure des bétons et mortiers.

II.5.5.1 Analyse MEB-EDS

Le microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'un microanalyseur à sonde électronique, JEOL JXA-8500F ainsi qu'un microscope de type Hitachi S-3400N avec un détecteur d'électrons rétrodiffusés (BSE) et la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) ont été utilisés. La figure II. 27 présente le dispositif de microscopie électronique à balayage utilisé dans le cadre de cette étude.

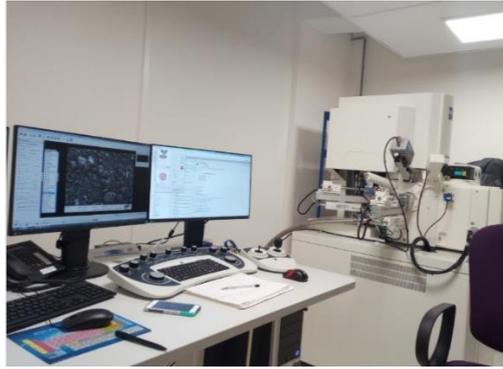


Figure II. 27 : Dispositif de microscopie électronique à balayage (MEB) au L2MGC

Les échantillons de dimension allant de 1,5 à 2,0 cm ont été prélevés au cœur de l'éprouvette de mortier. Les échantillons séchés ont été imprégnés dans une résine époxy et séchée pendant 24 heures. Ils ont été par la suite polis à l'aide d'une machine de polissage semi-automatique suivant la méthode indiquée dans [Scrivener, 2004]. La figure II. 28 présente la polisseuse automatique, ainsi que les échantillons de mortier imprégnés de résine et polis. D'autres échantillons ont été métallisés par des ions « or » afin de les rendre plus conducteurs.



Figure II. 28 : Polisseuse semi-automatique (a) et échantillons imprégnés de résine et polis (b) échantillons métallisés (c) au L2MGC

II.5.5.2 Analyse minéralogique des mortiers par RDX

Les analyses minéralogiques comparatives de DRX sur échantillons de mortiers broyés des formulations composées de 100%, 50% et 0% de sable de concassage ont été réalisées pour déterminer les éventuelles phases minérales cristallines formées après le mélange de ciment et les granulats. De manière spécifique, il est important de mettre en évidence et d'analyser la présence de la portlandite, des hydrates cristallins ou amorphes, les Silicates de Calcium Hydraté (C-S-H) néoformés. Ces analyses ont été réalisées sur des poudres de mortier suivant le même protocole que celui suivi pour la caractérisation des matières premières. L'analyse est réalisée au laboratoire SRO de l'Université Gustave Eiffel.

II.5.5.3 Analyse Thermogravimétrique ATG

L'analyse thermogravimétrique permet de suivre l'évolution de la masse d'un échantillon en fonction du temps et de la température. L'objectif de cette partie d'essais est d'analyser comparativement cette variation de masse sur des échantillons de mortier broyés des formulations composées de 100%, 50% et 0% de sable de concassage. L'essai est réalisé sur 100 à 110 g d'échantillon de matériau pulvérulent.

L'analyse thermique est conduite suivant le programme de température suivant :

- Départ à la température ambiante (proche de 25°C) ;
- Chauffage linéaire depuis la température ambiante jusqu'à 1100°C et à une vitesse de 10°C/min sous balayage d'air (80 ml/min).

L'exploitation des courbes permet d'identifier, et parfois de quantifier, les phases minérales contenues dans le béton. Leur présence ou leur absence est associée à des seuils de température.

Les pertes de masse associées à chaque point d'inflexion sont utilisées pour déterminer la teneur en portlandite, C-S-H et en calcite. L'appareil utilisé est le STA 449 F1 Jupiter développé par NETZSCH, et dont une image est présentée sur la figure II. 29.



Figure II. 29: Appareil ATG/ DSC NETZSCH STA 449 F1 Jupiter au L2MGC

II.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matières premières utilisées pour la formulation de bétons et mortiers. Trois carrières de granulats ont été identifiées et retenues afin de réaliser une étude comparative.

Nous avons ensuite présenté les procédures expérimentales de caractérisation des matières premières (granulats et ciment), ainsi que les normes et appareils utilisés. Les procédures de formulations des bétons et mortiers se sont basées sur le remplacement du sable de rivière par le sable de concassage dans des proportions de 100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 50 % et 0 % pour chacune des carrières. Deux campagnes de confections des éprouvettes, en France et au Cameroun, ont été menées.

Le programme expérimental de caractérisation des bétons et mortiers précise les différents essais réalisés sur le béton à l'état frais et durci. Concernant l'état frais, il s'agit notamment de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams et de l'essai d'étalement du béton frais. Les moyens expérimentaux d'essais de résistance à la compression et à la traction par fendage du béton, de la résistance à la compression et à la flexion trois points du

mortier sont détaillés. Les mesures des propriétés physiques : module d'élasticité dynamique et statique du béton, perméabilité au gaz, porosité ainsi que la conductivité et la diffusivité thermiques, sont ensuite explicitées avec les moyens expérimentaux de plusieurs laboratoires. Enfin, nous précisons les moyens de caractérisation de durabilité tels que l'étude du retrait sur éprouvettes de mortiers et bétons, de la carbonatation et de l'essai d'attaque chimique aux ions chlorures et ions sulfates sur éprouvettes de mortier.

A ces essais de caractérisation physico-mécaniques et de durabilité, s'ajoutent les outils de caractérisation de la microstructure des matériaux cimentaires : microscopie, analyse à diffraction aux rayons X (DRX), complétés par une analyse thermogravimétrique (ATG).

A la suite de ce chapitre, nous présenterons les résultats de la caractérisation des matériaux de base utilisés dans le cadre de cette recherche.

Chapitre III. CARACTERISATIQUES DES MATERIAUX

III.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons identifié et choisi les matériaux de base utilisés dans la formulation de bétons et mortiers. L'objectif du présent chapitre est d'évaluer les propriétés de ces matériaux, dans le but de mieux appréhender leurs influences sur le comportement des bétons et mortiers. Après avoir présenté les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques du ciment utilisé, une description macroscopique visuelle des faciès des roches est présentée, suivie d'une analyse pétrographique par observation en lames minces au microscope optique polarisant. Une étude de la composition chimique des granulats a été réalisée par fluorescence X, suivie d'une analyse minéralogique par DRX. Les propriétés physiques des granulats ont aussi été déterminées. L'analyse granulométrique, les mesures de masse volumique et de densité, ainsi que les caractéristiques telles que l'équivalent de sable, le module de finesse, le taux de fin ainsi que le coefficient Los Angeles sont déterminés pour les granulats. Ces caractérisations de matériaux (des granulats et ciment) ont été complétées par un examen microstructural au MEB, utilisant le mode de rétrodiffusion des électrons et couplé d'une EDS, sur des échantillons broyés et suivant les procédés décrits précédemment. Nous réalisons ainsi une carte d'identité de chaque matériau, tous en provenance du Cameroun, qui nous permettra d'analyser les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité dans les chapitres suivants.

III.2 LE CIMENT

Le ciment utilisé est un ciment de type portland NC CEM II de classe 42.5R, provenant de la société Dangoté au Cameroun. Sa résistance à la compression à 28 jours est de 55 MPa, sa masse volumique est $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$ et sa surface de Blaine est de 3425 cm²/g. Ce ciment est produit à Douala, commercialisé dans tout le Cameroun, est utilisé dans la formulation des bétons et mortiers.

III.2.1 Composition chimique

La composition chimique du ciment est présentée au tableau III.1. La figure III.1 présente l'image MEB/EDS de la morphologie des grains de ciment anhydre, illustrant l'hétérogénéité des grains de ciment et la large gamme de tailles des particules.

Tableau III. 1 : Composition chimique du ciment (%)

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
Proportions	25,9	7,2	6,4	0,1	2,6	48,9	1,0	0,9	0,9	0,3	2,7

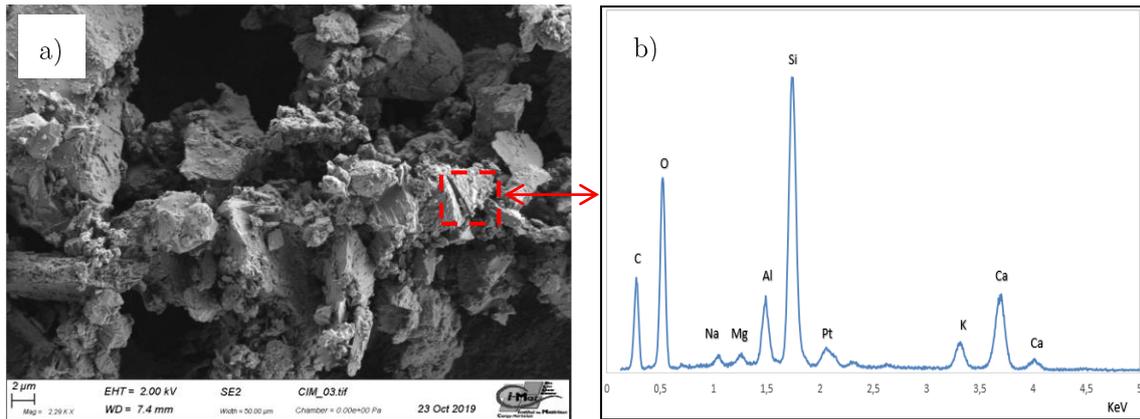


Figure III. 1 : Microstructure de la poudre de ciment : a) image MEB b). Spectres EDS

L'analyse montre que le ciment a une proportion importante de silice ($\%SiO_2 : 25,99 > 20$) [NF EN 196-2, 2006] et une faible proportion d'oxyde de calcium ($\%CaO : 48,91 < 50$), comparativement aux autres ciments CEM II dont la proportion en CaO varie de 60 - 65% conformément à la norme [NF EN 196-2, 2006]. D'après les données du tableau II.1, la teneur en alcalins, exprimée sous forme d'alcalins équivalents ($\% Na_2O + 0.658\% K_2O$) [Touze and Godart, 1997] est de 1,62 %. Avec le dosage en ciment de 350 kg/m^3 de béton, cette concentration en alcalins correspond à $5,67 \text{ kg/m}^3$, supérieure à la valeur limite de 3 kg/m^3 d'alcalins équivalents. Il y a donc un risque de développement du phénomène d'alcali-réaction. [Fasseu, 1997].

Le spectre des éléments chimiques du ciment présenté sur la Figure III.1b et déterminé par l'analyse à dispersion d'énergie à rayons X (EDX) est conforme à sa composition chimique. Nous observons en effet des pics importants de Silicium et d'Oxygène.

III.2.2 Composition minéralogique

Le tableau III.2 présente une estimation des proportions des minéraux indiqués sur la fiche technique. Cette composition minéralogique est complétée par des analyses DRX, dont le diffractogramme est présenté en Figure III.2.

Tableau III. 2 : Composition minéralogique (Fiche technique)

Constituants	C3S	C2S	C3A	C4AF
Proportions (%)	50-65	15-20	≤ 7	≤ 5

Nous observons une proportion majoritaire de silicates tricalciques (C3S), entre 50-65 %, une proportion entre 15-20 % de silicate bicalcique (C2S), et des proportions respectivement inférieures à 7 % et 5 % pour l'aluminate tricalcique (C3A) et l'alumino-ferrite tétracalcique (C4AF).

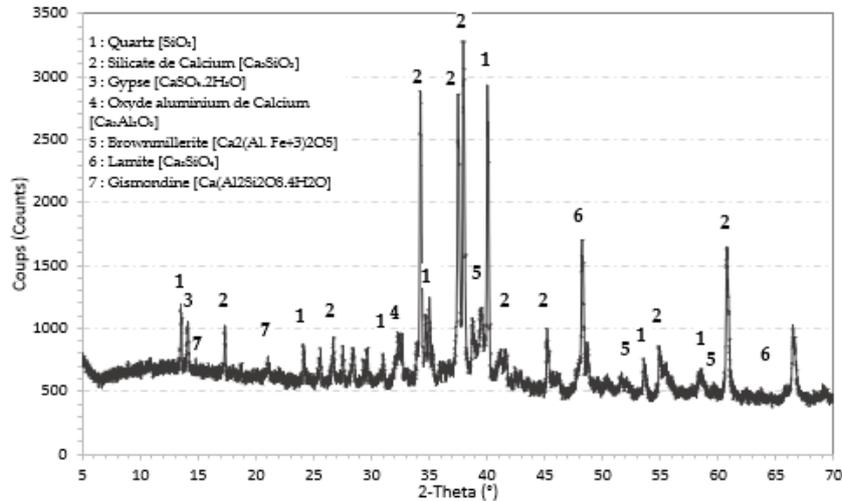


Figure III. 2: Diffractogramme du ciment Dangoté

L'analyse quantitative Rievelt des principales phases présentes dans le ciment est présentée dans le tableau III.3.

Tableau III. 3 : Estimation des proportions des différentes phases présentes dans le ciment

Phases minérales	Proportions (%)
Silicate de Calcium [Ca_3SiO_5]	50,5
Quartz [SiO_2]	23,4
Gypse [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]	4,6
Larnite [$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$]	10,8
Oxyde aluminium de Calcium [$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$]	5,6
Brownmillerite [$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe}^{+3})_2\text{O}_5$]	5,1

Les valeurs des teneurs obtenues sont conformes à l'analyse chimique et aux estimations de la fiche technique, à une différence non significative.

III.3 L'EAU

L'eau utilisée dans cette étude est celle du réseau d'eau potable de l'agglomération de Cergy-Pontoise, pour ce qui est des essais réalisés au L2MGC et celle provenant de la Camerounaise Des Eaux (CDE), pour les essais réalisés au LMMSp. Cela concerne les essais sur béton frais (affaissement, compacité, étalement), ainsi que les essais de résistance à la compression et à la traction par fendage sur éprouvettes cylindriques de 160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur. Ces eaux sont exemptes de toute substance chimique pouvant influencer les caractéristiques du béton et adaptées à la fabrication du béton. Ces eaux n'ont nécessité aucun test spécifique préalable, selon la norme NFP 18-404.

III.4 LES ROCHES

III.4.1 Description macroscopique

La figure III.3 présente des échantillons de roches extraits des sites d'exploitation des granulats. Ce sont des roches métamorphiques qui présentent à l'œil nu une alternance de lits clairs et de lits sombres de cristaux en feuillets orientés pour la roche présentée sur la figure image (a), issue de la carrière Razel. Nous observons sur l'image (b) une alternance et une mosaïque de cristaux de tailles sensiblement égales engrenés les uns dans les autres. Ces descriptions correspondent bien au gneiss tel que présenté au chapitre I § I.2. L'image (c) illustre les échantillons prélevés pour la confection des lames minces.

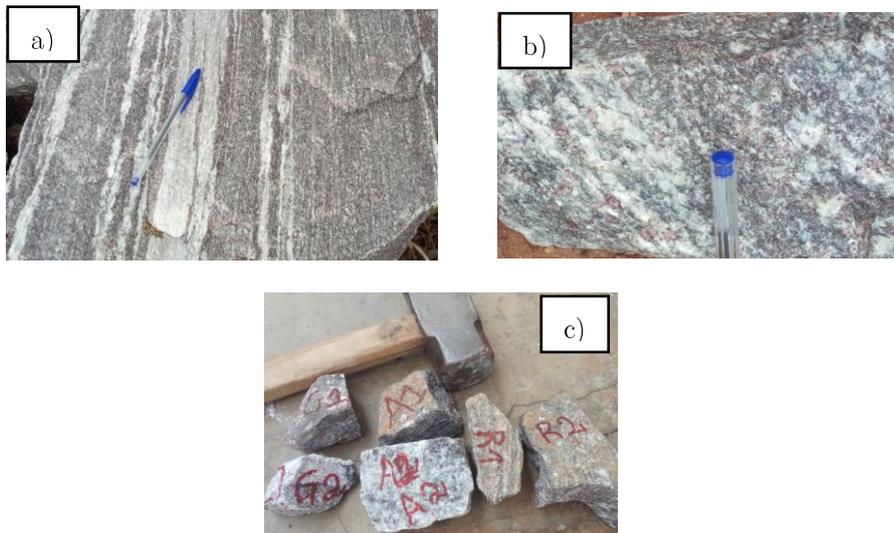


Figure III. 3: Images des échantillons de roches extraites des carrières ; a) Carrière Razel ; b) Carrière Arab Contractor ; c) ensemble de roches utilisées pour préparation des lames minces

III.4.2 Caractéristiques pétrographiques

L'analyse pétrographique est réalisée par observation en lames minces sur un microscope polarisant, suivant le protocole décrit au chapitre II. L'observation est faite en lumière polarisée non analysée (LPNA) et en lumière polarisée analysée (LPA). L'étude est faite sur deux échantillons de roche de chacune des carrières.

III.4.2.1 Roches de la carrière Arab Contractor

La figure III. 4 présente un grossissement de l'observation en lame mince à la lumière polarisée non analysée (LPNA) et à la lumière polarisée analysée (LPA) de la roche issue du site de la carrière Arab Contractor. L'analyse a permis de faire une estimation des proportions des principaux minéraux. Ces proportions sont consignées dans le tableau III.4.

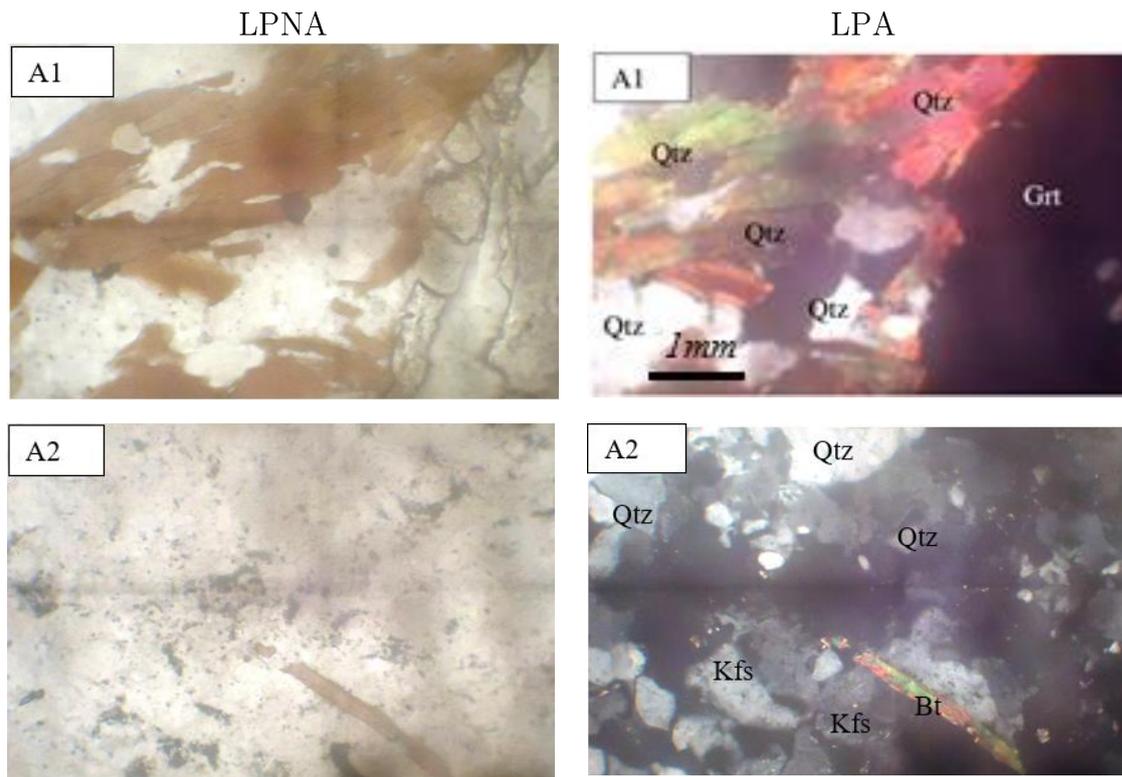


Figure III. 4 : Observation de la lame mince de la roche de la carrière Arab Contractor

Tableau III. 4 : Estimation des proportions des phases minérales présentes dans un échantillon de roche de la carrière Arab Contractor

Constituants	Quartz (Qtz)	Feldspath (Kfs)	Biotite (Bt)	Grenat (Grt)	Disthène	Muscovite
Pourcentage	45-55 %	15 -25%	15-20%	5-15%	2-4%	< 1%

L'observation en lame mince de l'échantillon montre que cette roche est majoritairement composée de quartz xénomorphe (45-55 %), engrainé, orienté et parfois polycristallin avec extinction roulante de taille comprise entre 0,2 – 3,5 mm. Le Feldspath est estimé à 15 -25 %, est identifié par le plagioclase (7-10 %), l'orthose (7-10 %) et le microcline (1-2 %), qui est généralement associé au quartz et parfois orienté, de taille entre 0,5-2 mm sur 0,2-1mm. La biotite, estimée à 25-30 %, est identifiée en paillettes orientées, généralement agglutinées et parfois déformées de longueur entre 0,5-1,5 mm. On a également la présence de grenat (5-15 %) xénomorphe et craquelé, de taille entre 0,2 -3,5 mm sur 0,2-2,5 mm, à inclusion de quartz. Une faible proportion de disthène (2-4 %) automorphe à subautomorphe en prismes est observée, parfois très allongé, parfois à inclusion de quartz, de taille entre 0,2 -4 mm. On note également la présence de trace d'Oxydes (< 1 %), qui est sans doute essentiellement issue de l'altération des biotites. La classification de cette roche, selon [Aubry et al., 1975] correspond, suivant une description métamorphique, à un Gneiss à biotite et grenat faiblement micacé, de texture granolépidoblastique hétérogranulaire et orienté.

III.4.2.2 Roche de la carrière Gracam

La figure III. 5 présente le grossissement de l'observation en lame mince à la lumière polarisée non analysée (LPNA) et à la lumière polarisée analysée (LPA) de la roche issue du site de la carrière de Gracam. Les estimations de proportions des phases présentes dans la roche sont consignées dans le tableau III.5.

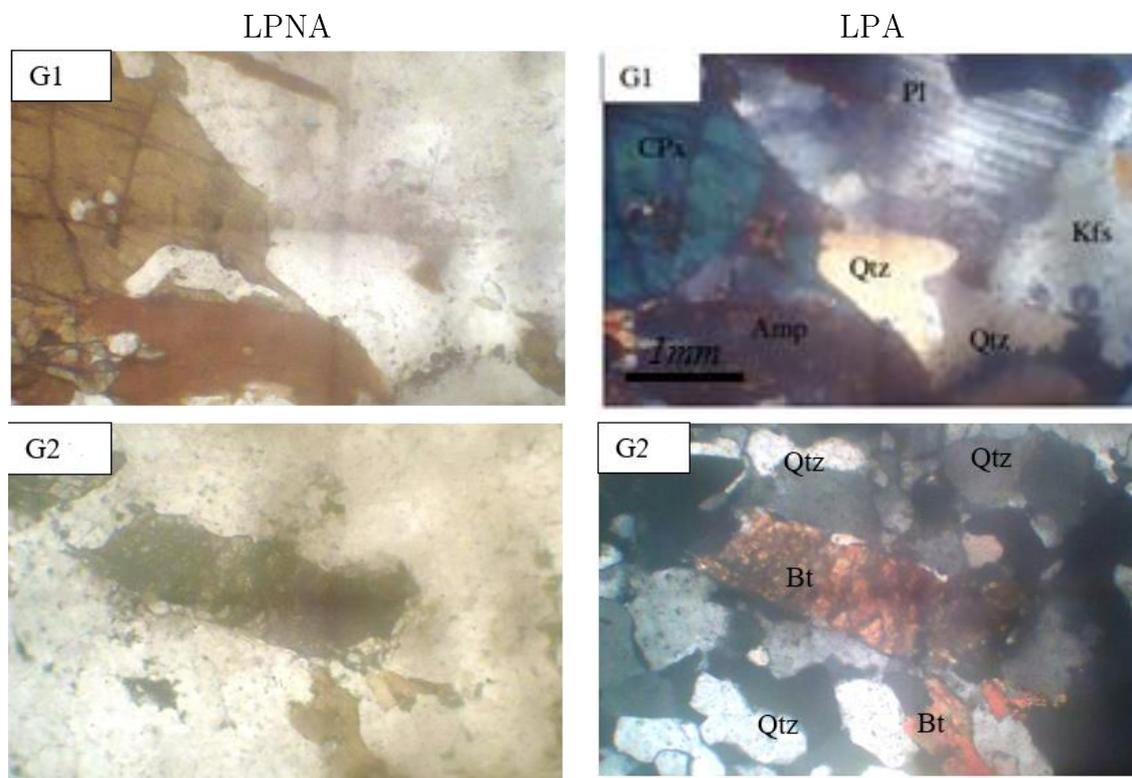


Figure III. 5 : Observation de la lame mince de la roche de la carrière Gracam

Tableau III. 5 : Estimation des proportions des phases minérales présentes dans un échantillon de roche de la carrière Gracam

Constituants	Quartz (Qtz)	Feldspath (Kfs)	Biotite (Bt)	Grenat (Grt)	Pyroxène	Muscovite
Pourcentage	65-70%	10 -15%	5-7%	2-5%	0,5-2%	< 1%

L'analyse des résultats montre que cette roche est principalement composée de quartz xénomorphe (65-70 %), engrainé, orienté et extinction roulante, parfois polycristallin, de taille entre 0,1-1,5 mm. Le feldspath y est également retrouvé, mais en faible proportion (10-15 %), représenté par le plagioclase (12-15 %) et l'orthose (8-10 %) subautomorphe à xénomorphe, généralement associé au quartz, de taille entre 0,3-1,2 mm sur 0,2-0,7mm. La biotite est aussi faiblement retrouvée (5-7 %) en paillettes orientées soulignant la schistosité, de longueur entre 0,2-0,9 mm. On note également une petite proportion de grenat (2-5 %) xénomorphe et généralement craquelé et à inclusion de quartz, de taille entre 0,3-4 mm sur 0,2-3 mm. Le pyroxène (0,5-2%) est présent en section basale et

longitudinale à inclusion de quartz et grenat, de taille entre 0,5-1,5 mm sur 0,2-0,4 mm. Des traces de muscovite (< 1%) sont présentes, en paillettes orientées, de longueur entre 0,2-0,6 mm.

La classification de cette roche, selon [Aubry et al., 1975] fait correspondra à un Gneiss quartzite à biotite et grenat, de texture granoblastique hétérogranulaire et orienté.

III.4.2.3 Roche de la carrière de Razel

La figure III. 6 présente le grossissement de l'observation en lame mince à la lumière polarisée non analysée (LPNA) et à la lumière polarisée analysée (LPA) de la roche issue du site de la carrière de Razel. Les principaux minéraux présents dans cette roche ainsi qu'une estimation des proportions sont présentés dans la le tableau III.6.

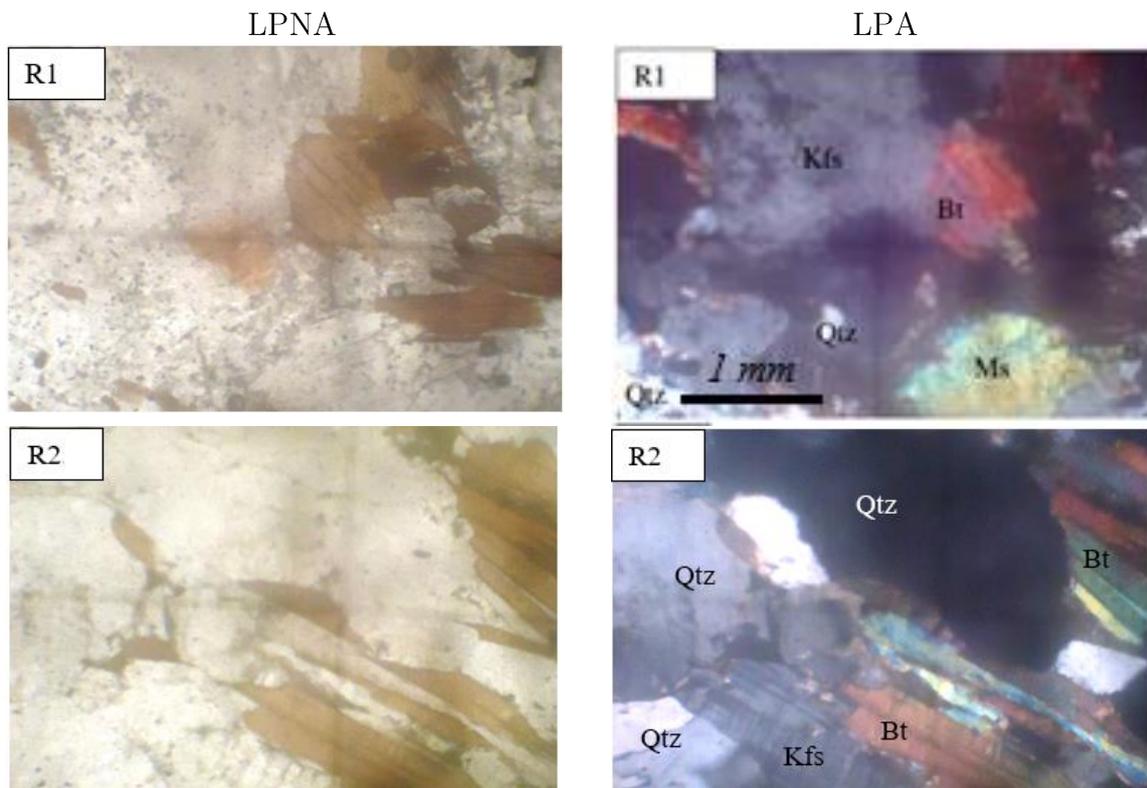


Figure III. 6 : Observation de la lame mince de la roche de la carrière Gracam

Tableau III. 6 : Estimation des proportions des phases minérales présentes dans un échantillon de roche de la carrière Razel

Constituants	Quartz (Qtz)	Feldspath (Kfs)	Biotite (Bt)	Grenat (Grt)	Disthène	Muscovite
Pourcentage	50-55%	20-22%	15-20%	2-3%	7-10%	< 1%

L'observation de la lame mince de cette roche a également montré qu'elle est majoritairement composée de quartz (50-55 %) xénomorphe, à extinction roulante, généralement engrainé et orienté, parfois polycristallin, de taille entre 0,2 -2 mm. Le feldspath (20-22 %), représenté par le plagioclase (5-10 %), l'orthose (10-15 %) et le microcline (<1 %), xénomorphe à subautomorphe, généralement associée au quartz, de taille entre 0,2-1,2 mm sur 0,2-0,5 mm. On a observé une proportion importante de biotite (30-35 %), en paillettes généralement orientée soulignant la schistosité, de longueur entre 0,3-0,9 mm. Une faible quantité de grenat (2-3%) subautomorphe à xénomorphe, généralement très craquelé, de taille entre 0,2-0,8 mm sur 0,2-0,3 mm a été également observée, ainsi que de la disthène (7-10 %) automorphes à subautomorphe, en prismes parfois très allongés, parfois à inclusion de quartz, de taille entre 0,3 -4 mm sur 0,2 -0,5 mm. Des traces de muscovite (<1%) en paillettes orientées de longueur entre 0,2-0,7mm ont également été observées.

La classification de cette roche, selon [Aubry et al., 1975] fait correspondra à un Gneiss à biotite et disthène, de texture granoblastique à tendance granolépidoblastique hétérogranulaire et orientée.

III.4.2.3 Comparaison des roches

Nous présentons un bilan de cette analyse pétrographique en fonction de l'origine des roches. Le diagramme de la figure III. 7 présente l'estimation des proportions des minéraux présents dans les roches des trois carrières.

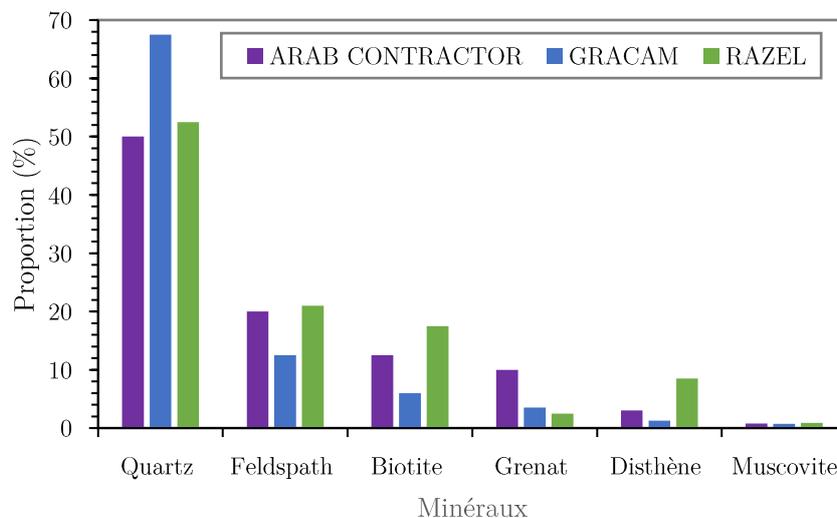


Figure III. 7 : Estimation des proportions des minéraux obtenue par observation en lame mince

Le graphique montre que toutes les roches sont majoritairement composées de quartz, avec la plus grande proportion estimée pour la roche de la carrière Gracam (67,5 %). Cela laisse présager une meilleure stabilité thermique des composés avec les granulats de cette carrière. En effet, le quartz dispose d'une cristallinité et d'une microstructure qui jouent un rôle important dans leur stabilité thermique [Makani, 2011; Xing, 2011; Niry Razafinjato, 2015]. Les autres minéraux présents dans les roches (feldspath, biotite, grenat, disthène) semblent avoir les proportions comparables dans les roches des trois carrières. Toutefois, l'étude confirme bien que toutes les roches semblent avoir globalement une minéralogie similaire.

III.5 PROPRIETES DES SABLES

Les sables de carrière sont notés SA, SG et SR, correspondants respectivement aux carrières exploitées par Arab Contractor (A), Gracam (G) et Razel (R). Le sable de rivière utilisé provient du fleuve Sanaga (Cameroun) et est noté SS. Dans cette section, nous présentons les compositions chimique et minéralogique, ainsi que les caractéristiques physiques des différents sables.

III.5.1 Composition chimique

La composition chimique des éléments majeurs et mineurs présents dans les échantillons de sables est présentée dans le tableau III.7. La Figure III.8 présente une analyse comparative des images MEB et spectres EDX du sable de carrière SR et du sable de rivière SS.

Tableau III. 7 : Composition chimique des sables

Sable	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PAF
SA	65,5	15,7	7,8	0,2	2,7	1,4	1,8	2,7	0,9	0,1	0,6
SG	62,5	16,6	8,8	0,2	3,2	1,7	1,8	2,7	1,0	0,2	0,4
SR	67,5	13,7	7,7	0,5	2,4	2,2	1,8	2,1	1,0	0,2	0,5
SS	90,2	4,0	1,5	0,1	0,1	0,2	0,4	2,0	0,2	--	0,8

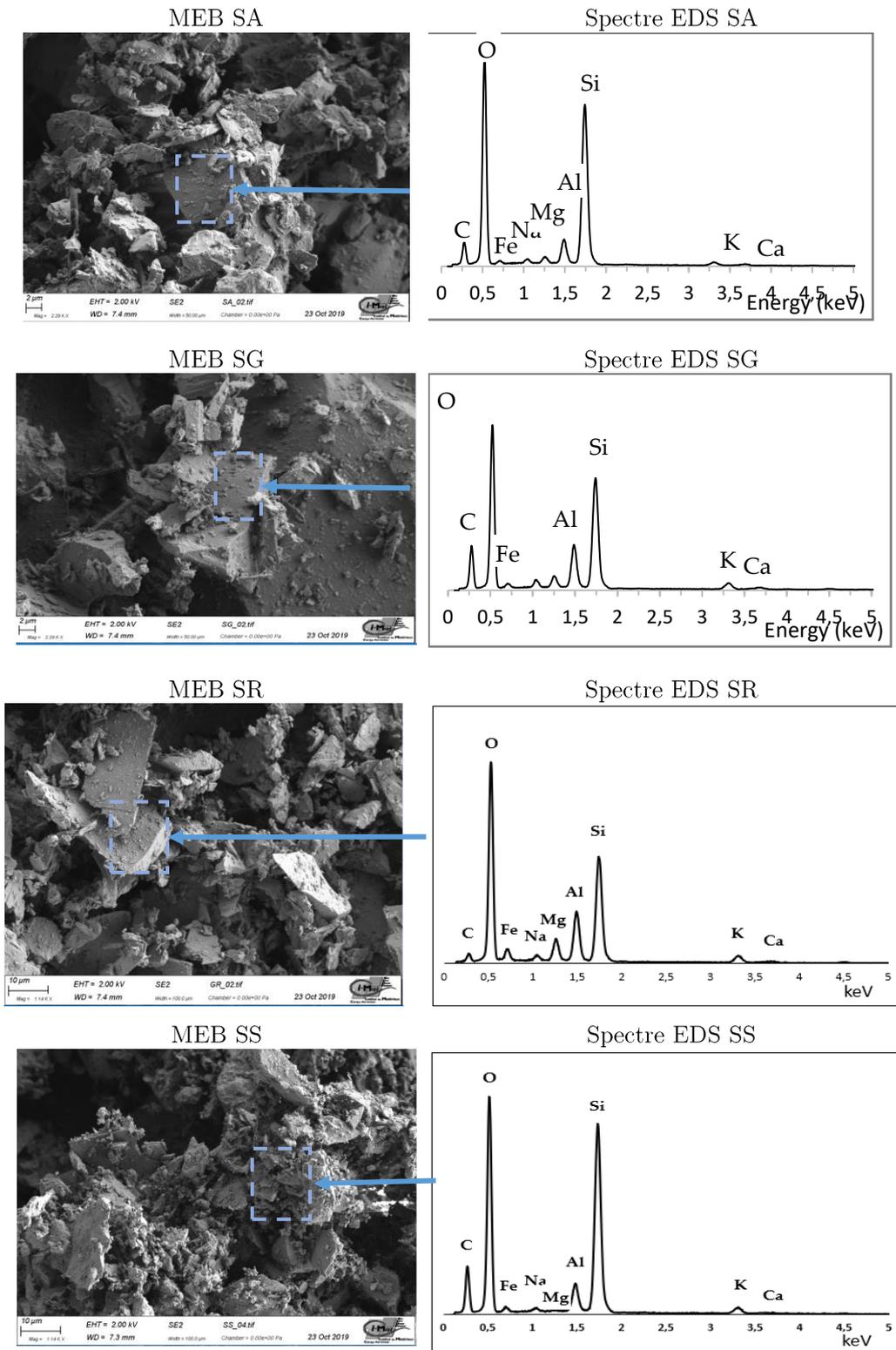


Figure III. 8 : Images MEB et spectres EDS des sables SA, SG, SR et SS

L'analyse chimique des sables a montré que tous les sables de concassage sont majoritairement composés de silice (SiO_2), avec une teneur en silice supérieure à 62 %. Le sable de rivière SS est plus riche en SiO_2 (90,16 %) que les sables de concassage (entre 62,5 et 67,5 %). Les proportions d'aluminium et d'oxyde de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) sont

respectivement de 23,45 %, 25,42 % et 21,39 % pour SA, SG, SR, alors que cette proportion n'atteint que 5,5 % pour le sable de rivière SS. Les pourcentages d'équivalents alcalins ($\% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \% \text{K}_2\text{O}$) de tous ces sables ne sont pas significativement différents, avec des valeurs respectivement de 3,84 %, 3,89 %, 3,33 % et 2,29 % pour SA, SG, SR et SS, respectivement. Les sables concassés ont une teneur en calcium (CaO) environ 7 fois plus élevée que celle des sables de rivière. La perte au feu est faible pour tous ces sables, qui ne disposent presque pas de matières organiques. Cette analyse comparative des proportions des compositions chimiques des sables des trois carrières est illustrée sur la figure III. 9.

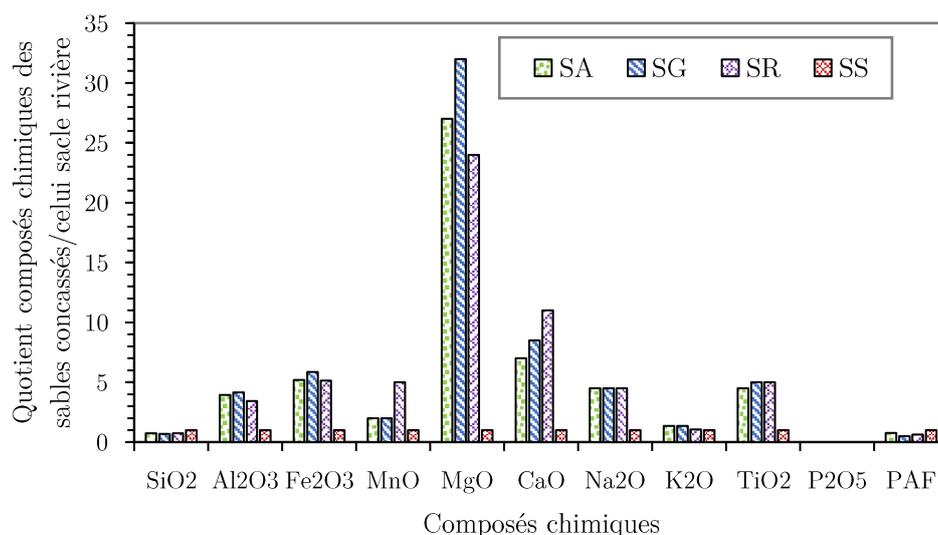


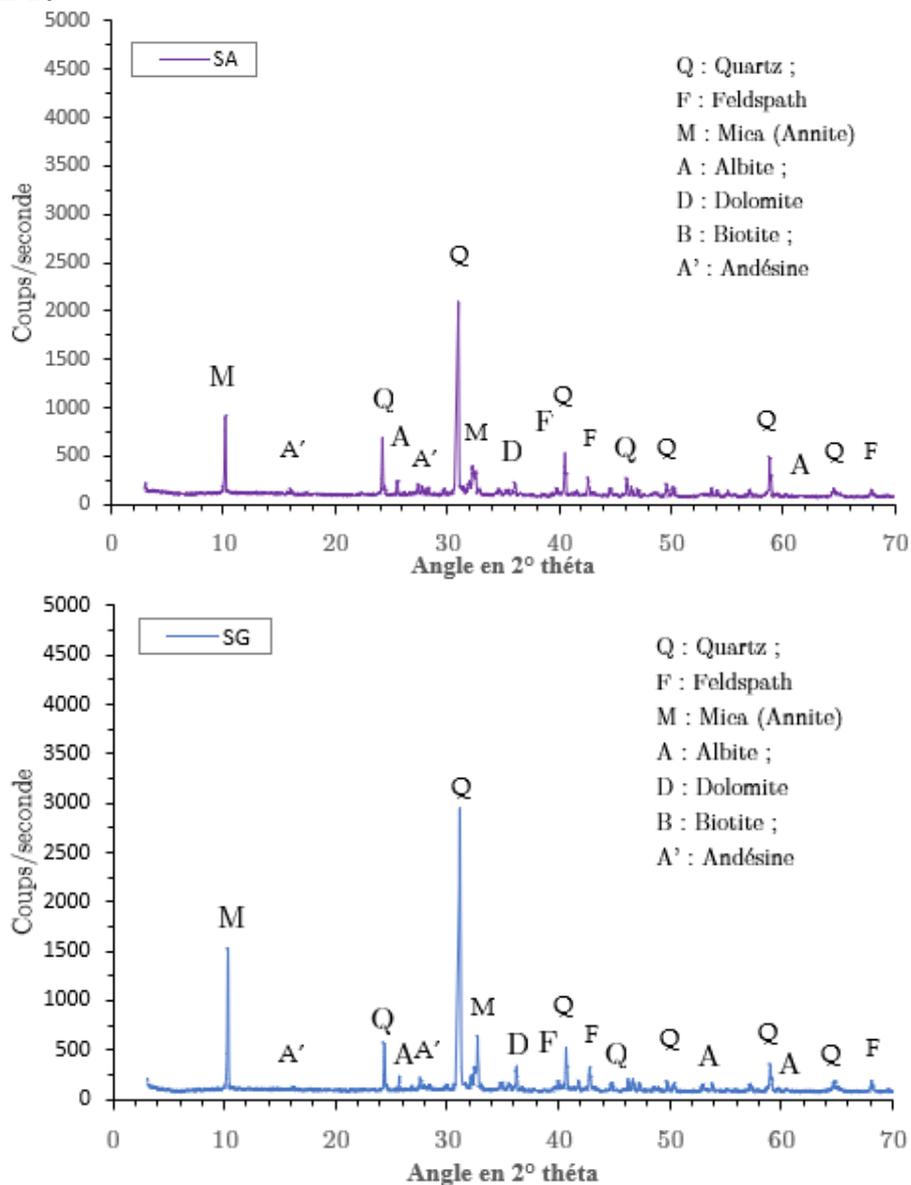
Figure III. 9 : Comparaison des proportions des composés chimiques présents dans les sables concassés, par rapport à celles du sable de rivière.

On peut également voir à travers ce graphique que l'oxyde de magnésium est 32 fois plus présent dans le sable de la carrière Gracam que dans le sable de rivière. Cette proportion est de 27 et 24, respectivement pour les sables des carrières Arab Contractor et Razel. D'autre part, les images MEB montrent la forme hétérogène et angulaire des particules des sables concassés, comparativement à celles du sable de rivière. L'analyse chimique élémentaire par EDX montre une prédominance du silicium (Si) et d'oxygène (O₂) dans les échantillons des deux types de sable, avec des hauteurs de pics beaucoup plus importants pour le sable de rivière. On observe la présence de quelques éléments, à savoir : le magnésium (Mg), l'aluminium (Al), le potassium (K), le fer (Fe) et le sodium (Na), dont les hauteurs des pics sont beaucoup plus importantes dans l'échantillon de sable de concassage (Image b) que dans le sable de rivière (Image d). On peut également observer la présence de calcium (Ca) dans les deux types de sable.

III.5.2 Composition minéralogique

L'analyse comparative de la minéralogie des différents sables concassés et le sable de rivière est réalisée à l'aide de la diffraction aux rayons X. Cette diffraction nous a permis

de caractériser les phases minérales et de préciser la structure cristalline des sables. Le résultat est présenté sous forme de spectre d'énergie du faisceau diffracté en fonction de l'angle de diffraction 2-théta. Les diffractogrammes obtenus ont été traités et présentés en figure III.10.



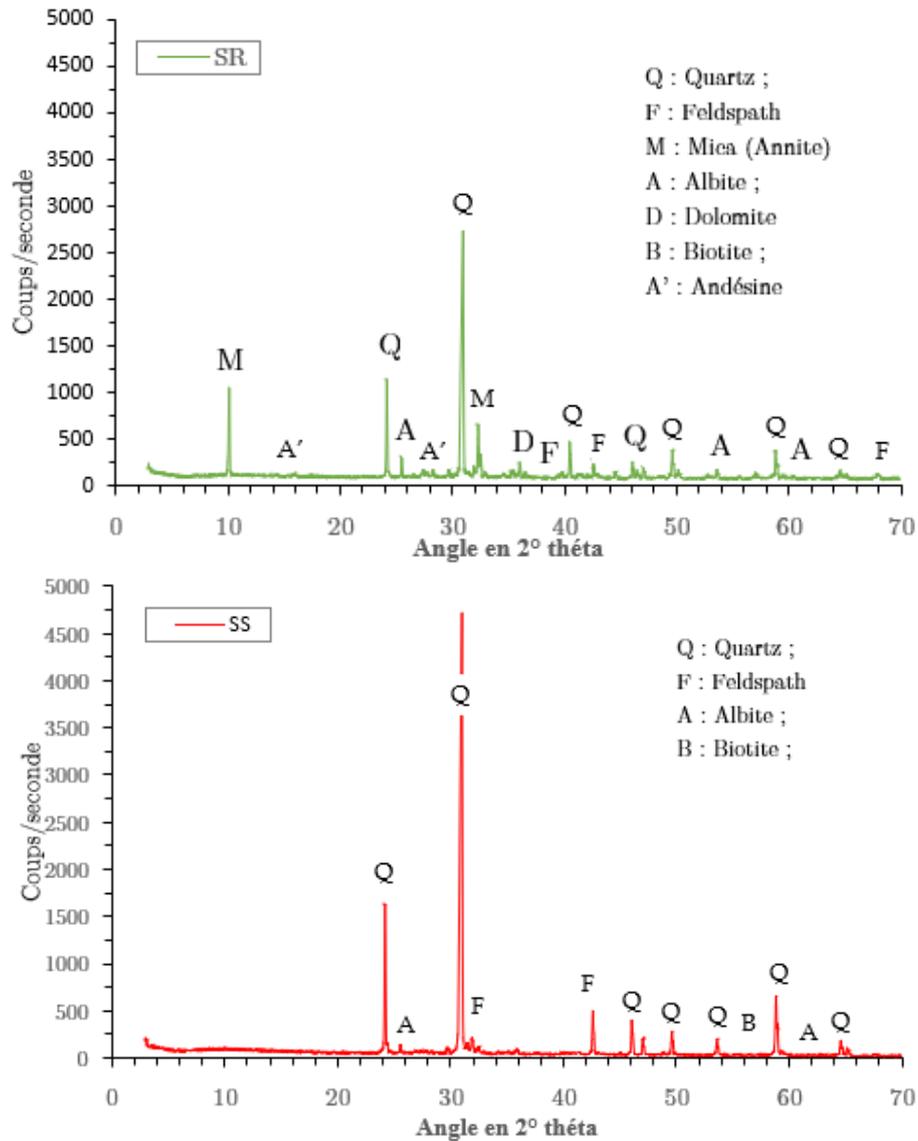


Figure III. 10 : Diagrammes diffractogrammes des différents sables SA, SG, SR et SR

L'analyse DRX des sables de concassage a révélé en moyenne un degré de cristallinité des 3 sables concassés d'environ 96 %. L'analyse quantitative des modèles DRX avec le logiciel TOPAS et utilisant la méthode Rietveld a montré un degré de cristallinité du sable de rivière d'environ 97 %. Cette analyse a permis de faire une estimation des proportions des principales phases et les résultats sont consignés dans le tableau III.8.

Tableau III. 8 : Estimation des proportions des différentes phases présentes dans les sables

Phases minérales	SA	SG	SR	SS
Quartz [SiO ₂]	53,8	67,4	57,2	89,6
Feldspaths microcline [K(AlSi ₃)O ₈]	15,5	12,1	9,3	7,5
Almandine [Al ₂ Fe ₃ (SiO ₄) ₃]	10,3	7,3	15,3	--
Albite [Na(Si ₃ Al)O ₈]	10,7	8,2	9,7	2,8
Biotite [K(MgFe)3(OH) ₂ (Si ₃ AlO ₁₀)]	2,0	0,1	0,1	0,1
Mica (Annite) [Si ₃ AlO ₁₀ (OH)2Al2K]	3,8	2,1	4,1	--
Andésine [(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈]	3,4	3,0	4,0	--
Dolomie [CaMg (CO ₃) ₂]	0,3	0,1	0,2	--

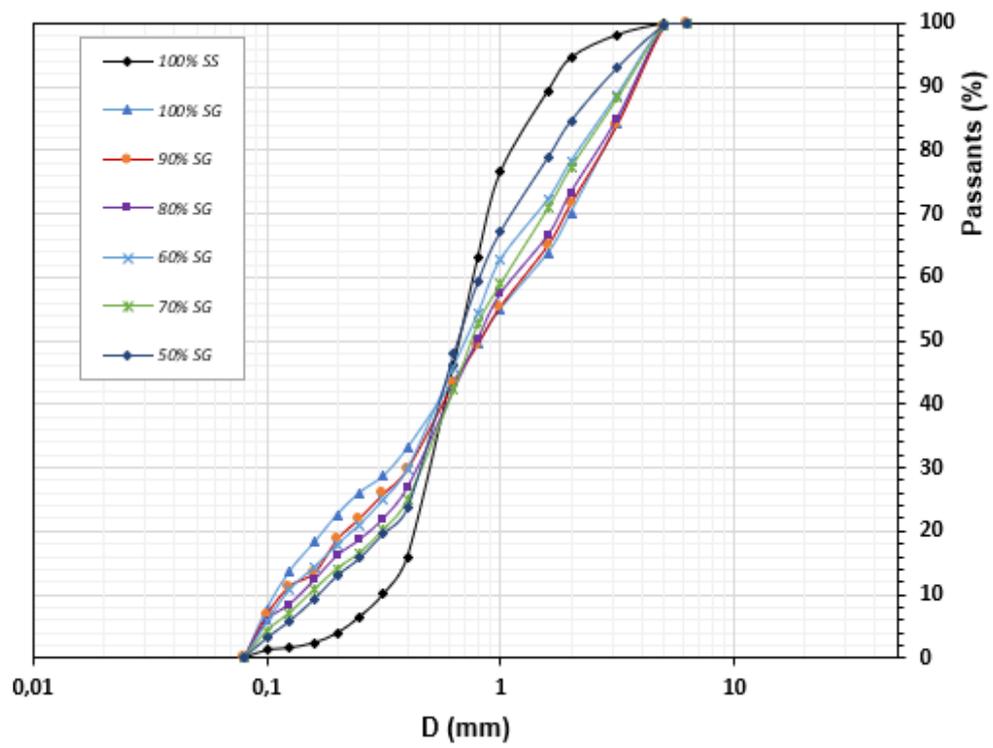
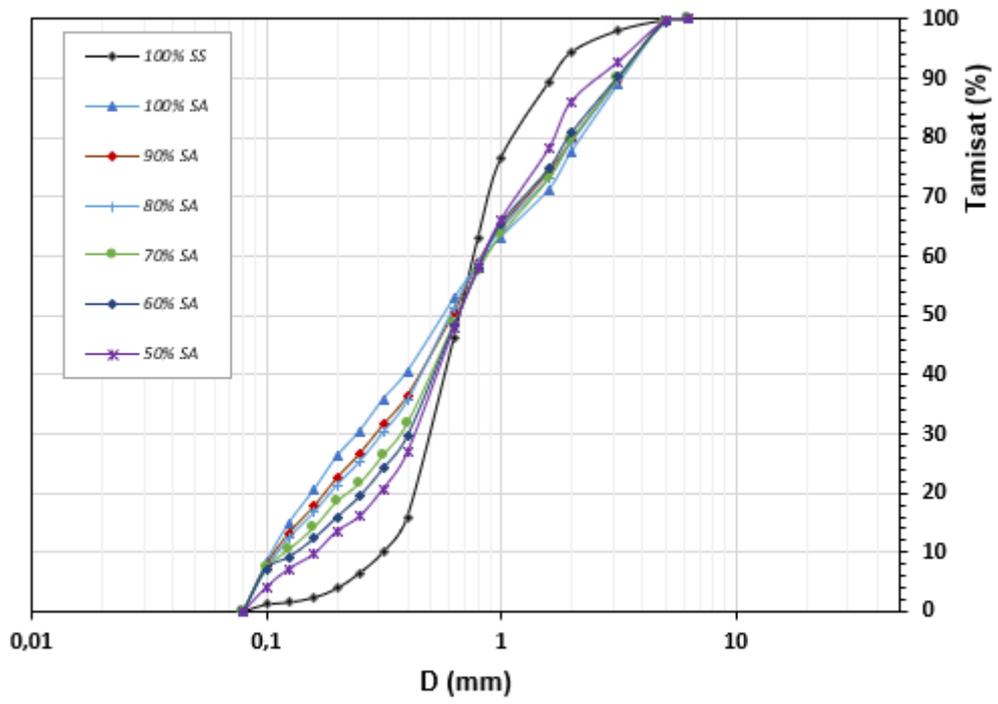
L'analyse montre que le sable de rivière est essentiellement composé de quartz (90 %), puis de feldspaths (9 %). Des traces de biotite y ont également été observées. Cette composition minéralogique confirme qu'il s'agit d'un sable siliceux. L'étude a révélé des phases cristallines similaires dans tous les trois sables concassés, mais avec des hauteurs de pics différents. Ainsi, les sables des trois carrières semblent avoir une minéralogie semblable, bien qu'issus des sites de carrières différentes. Ils sont constitués majoritairement de quartz, dans des proportions proches (entre 54 % et 67 %), de feldspaths (entre 28 % et 36 %) puis d'éléments secondaires (micas et andésine). Ces sables contiennent davantage de micas (3 %) par rapport au sable de rivière. Les résultats obtenus sont cohérents avec les estimations faites par observation en lame mince. Cette minéralogie est conforme à l'origine géologique des sables (Gneiss). Toutefois, les traces de dolomie (0,2 %) retrouvées et susceptibles de favoriser des dégradations telles que l'alcali-réaction peuvent provenir des déchets présents dans les échantillons de sable.

III.5.3 Caractéristiques physiques

Dans ce paragraphe, sont exposés quelques paramètres physiques qui permettent de caractériser les différents types de granulats. Nous nous intéressons notamment à la granulométrie, au taux de particules fines, à l'équivalent de sable ainsi qu'à la masse volumique.

III.5.3.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est réalisée sur les sables des trois carrières et sur les mélanges de sable de carrière avec le sable de rivière. Les pourcentages de passants cumulés sont représentés sous forme de courbes granulométriques. Les courbes sont tracées de manière continue dans un repère semilogarithmique, en portant les ouvertures des tamis en abscisse, et les pourcentages de passant en ordonnée. La figure III.11 présente les courbes granulométriques fuseaux des mélanges de sables des différentes carrières au sable de rivière.



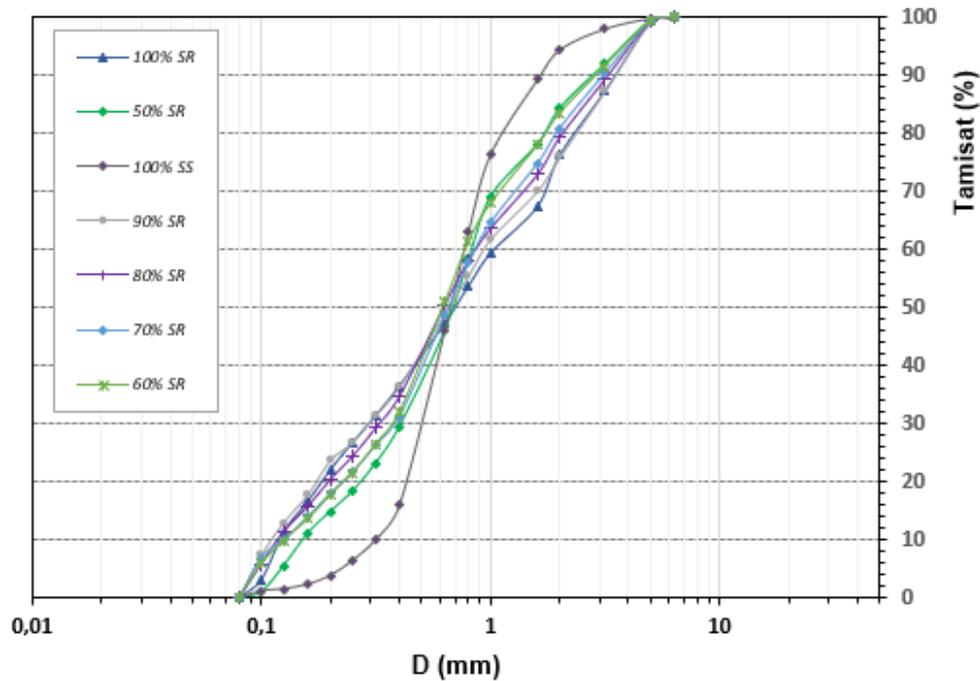


Figure III. 11 : Courbes granulométriques fuseaux des mélanges de sables.

A l'observation des trois fuseaux, toutes les courbes des mélanges (90 - 10 ; 80 - 20 ; 70 - 30 et 50 - 50) sont contenues dans celles de 100 % de sable de carrière et celle de 100 % de sable de rivière. Cela valide les résultats de l'échantillonnage et du tamisage effectué. L'analyse des résultats de l'étude granulométrique apportent les renseignements suivants :

- Les sables de concassage ont une granulométrie relativement comparable, avec une forme à tendance linéaire, et une distribution de tailles de grains allant de 0,07 à 6 mm,
- Le sable de rivière a une forme en S, et une distribution de tailles de grains allant de 0,07 à 5 mm,
- L'analyse de ces courbes montre que tous les sables sont bien gradués, avec une granulométrie continue et bien répartie (le coefficient d'uniformité $C_c < 2$),
- Par ailleurs, les sables de concassage ont une granulométrie étalée ($C_u > 3$) tandis que le sable de rivière a une granulométrie serrée ($C_u < 2$),
- Les mélanges de sable à 50 % ont permis d'avoir une correction de la distribution granulaire.

III.5.3.2 Teneur en fines et module de finesse

Les résultats du module de finesse et de la teneur en fines ($< 80 \mu m$) des différents sables sont consignés dans le tableau III.9. La figure III.12 présente le rapport du taux de fines des sables concassés sur celui du sable de rivière, ainsi que le rapport du module de finesse des sables concassés sur celui du sable de rivière.

Tableau III. 9 : Teneur en fines et module de finesse des sables

Sables	Taux de fines (Tf < 80 µm, en %)	Module de finesse (Mf)
SA	6,3	2,4
SG	8,3	2,7
SR	7,6	2,6
SS	1,4	2,6

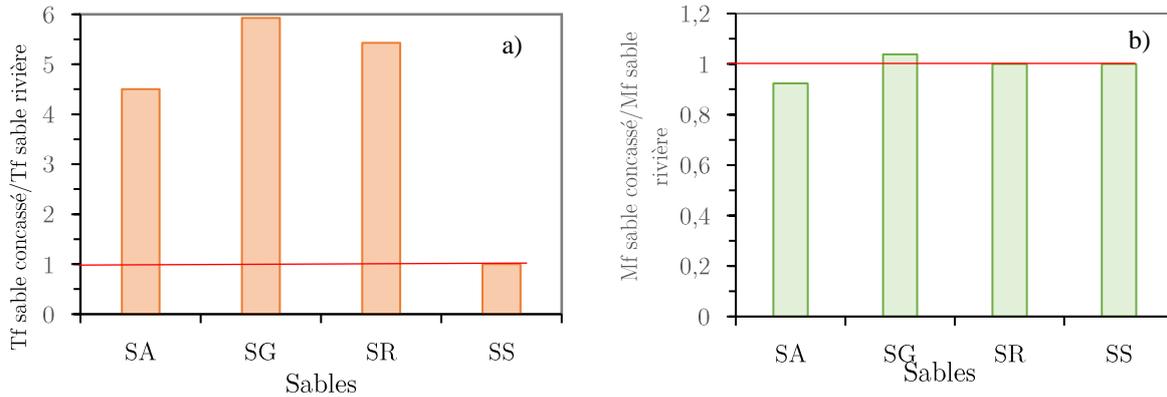


Figure III. 12 : Rapport du taux de fines sable concassé/taux de fines sable rivière (a) ; rapport module de finesse sable concassé/module de finesse sable rivière (b)

La fraction fine des sables varie de 1,4 % (SS) à 8,3 % (SG), indiquant que les sables de concassage présentent une teneur en particules fines assez importante par rapport au sable de rivière. On peut clairement voir sur la figure III.12 que les fines du sable de concassé semble être 5 fois plus importante dans les sables concassés que dans le sable de rivière (image a). Bien que les sables concassés ont un taux de fine élevé par rapport au sable de rivière, on observe que tous les sables ont un module de finesse assez similaire (image b) avec des valeurs comprises entre 2,4 et 2,7. Ils sont donc qualifiés d'utilisables pour la fabrication de béton avec un risque limité de ségrégation [Gorisse G. et J, 1998]. Rappelons que ce taux élevé de fine et le module de finesse du sable ont une influence sur l'ouvrabilité du mortier ou du béton confectionné avec ce sable [Joudi-Bahri et al., 2012; Kwan et al., 2014; Khouadjia et al., 2015].

III.5.3.3 *Equivalent de sable*

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable des sables de concassage et du sable de rivière sont présentés dans le tableau III. 10. La figure III.13 présente le rapport de l'équivalent de sable des sables concassés sur le celui du sable de rivière.

Tableau III. 10 : Equivalent de sable des sables utilisés

Sables	SA	SG	SR	SS
Equivalent de Sable (ES %)	87,3	89,9	82,5	95,9

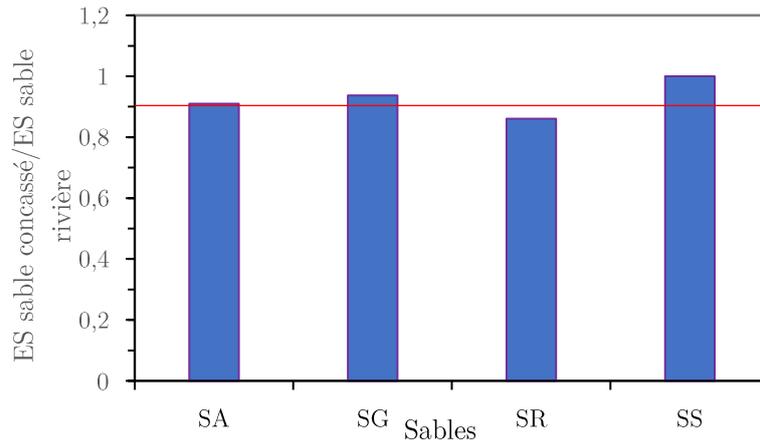


Figure III. 13 : Rapport de l'équivalent de sable des sables concassés sur celui du sable de rivière

Les valeurs d'équivalent de sable sont toutes supérieures à 80 % (entre 82,5 et 95,5 %), traduisant la propreté élevée des sables (sables dépourvus de particules végétales, de scories, ...). Ces résultats se justifient par les faibles valeurs en fines présentées au paragraphe précédent. Cette propreté des sables peut par contre générer un risque de défaut de plasticité du béton [NF P 18-598].

III.5.3.4 Compacité granulaire

Le coefficient de compacité des différents sables est présenté dans le tableau III.11. La figure III.14 présente le rapport des valeurs de coefficients de compacité granulaire des sables concassés sur le celui du sable de rivière.

Tableau III. 11 : Coefficient de compacité des sables étudiés

Sables	SA	SG	SR	SS
Compacité Φ	0,7	0,8	0,6	0,4

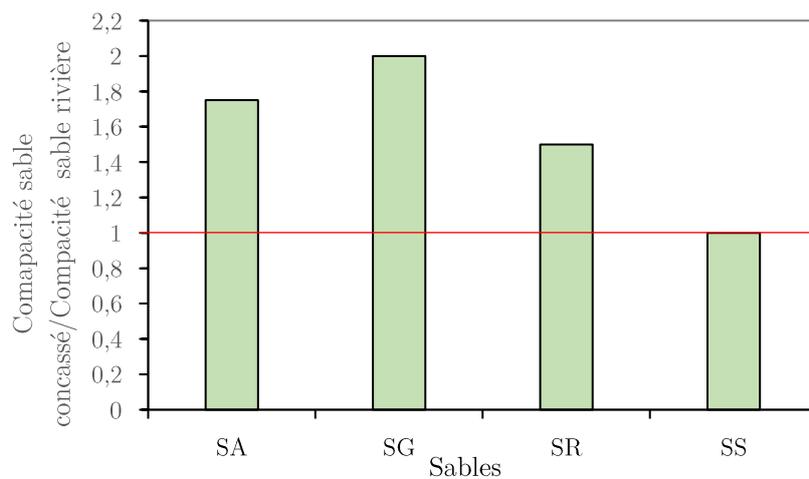


Figure III. 14 : Compacité du sable concassé en fonction de celle du sable de rivière

On observe une faible compacité du sable de rivière par rapport aux sables de concassage, ceci s'explique par le caractère serré des grains observé dans l'analyse granulométrique. Cela traduit le volume d'air important entre les grains de sable de rivière, comparativement à celui présent entre les grains de sables de carrière. Cette situation pourra avoir une conséquence sur la compacité du béton frais et durci et donc sur la porosité et la carbonatation du béton [Sadok et al., 2015]. La faible compacité serait due à la faible quantité de fines dans ce sable de rivière.

III.5.3.5 Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau des différents sables est présenté dans le tableau III.12. L'analyse comparative des valeurs obtenues est illustrée par le diagramme de la figure III. 15.

Tableau III. 12: Absorption d'eau des sables

Sables	SA	SG	SR	SS
Absorption (%)	1,9	2,5	2,0	0,5

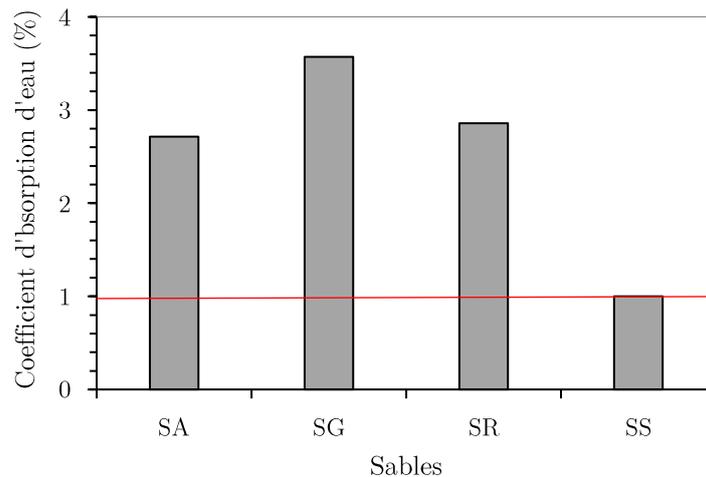


Figure III. 15 : Valeurs de rapport des coefficients d'absorption des sables concassés par rapport à celui du sable de rivière

Les résultats montrent une similarité du coefficient d'absorption des sables de concassage (de 1,87 à 2,53 %). Ces sables absorbent en moyenne 3,5 fois plus d'eau en 24 h que le sable de rivière (0,52 %). Ces résultats s'expliquent par le fait que l'absorption d'eau augmente lorsque la taille des grains diminue [Khouadjia, 2016]. Nous avons mesuré des taux de fines supérieurs pour les sables concassés. Ainsi, l'accroissement de la surface spécifique dû aux taux de fines plus élevés pour les sables de concassage augmente le nombre de capillaires vers l'extérieur [Ke, 2008].

III.5.3.6 Masse volumique et densité

Les valeurs de masse volumique et de densité (apparente et absolue) des différents sables sont consignées dans le tableau III. 13. Le graphique de la figure III. 16 illustre la comparaison des densités apparente et absolue des sables concassés par rapport au sable de rivière.

Tableau III. 13 : Masses volumiques et densités absolues et apparentes des sables

Sables	$\rho_{\text{Apparente}}$ (g/l)	ρ_{Absolue} (g/l)	$d_{\text{Apparente}}$	d_{Absolue}
SA	1678	2740	1,7	2,7
SG	1874	2864	1,9	2,9
SR	1826	2797	1,8	2,8
SS	1392	2622	1,4	2,6

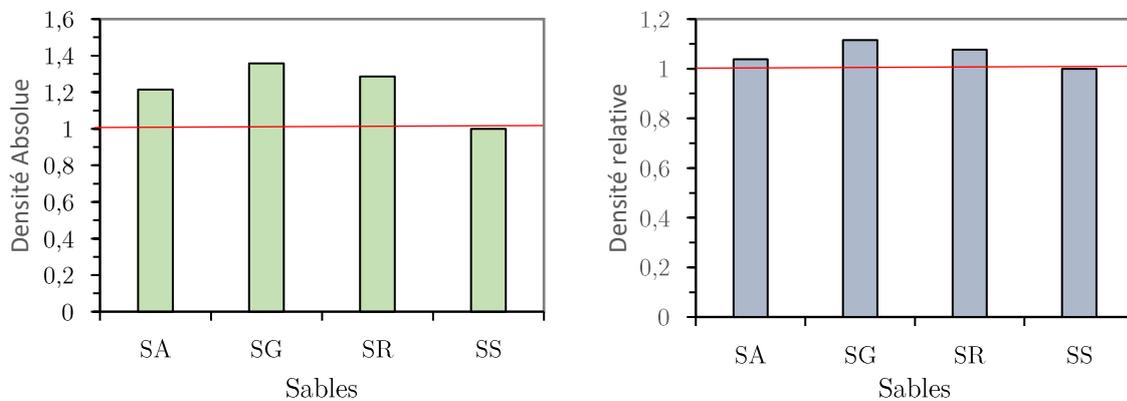


Figure III. 16 : comparaison des densités apparente et absolue des sables concassés par rapport au sable de rivière.

L'étude montre une faible valeur de la masse volumique et de la densité apparente du sable de rivière par rapport aux sables de concassage, ceci s'explique par les vides intergranulaires dans le sable de rivière (faible taux de fines). Par contre, on observe une différence non significative des valeurs de la masse volumique et de la densité absolue des sables de concassage et du sable de rivière.

III.6 LES GRAVILLONS

Les graviers sont notés GA, GG et GR et correspondent respectivement aux carrières exploitées par Arab Contractor (A), Gracam (G) et Razel (R). Dans cette section, nous présentons les compositions chimique et minéralogique, ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques des gravillons des différentes carrières.

III.6.1 Composition chimique

La composition chimique des gravillons est présentée dans le tableau III.14. La Figure III.17 présente une analyse comparative des images MEB et spectres EDX des graviers des trois carrières. Le diagramme de la figure III.18 illustre la variation des proportions des composés contenus dans les graviers, comparativement à ceux contenus dans les sables de la même carrière.

Tableau III. 14 : Composition chimique des graviers

Sables	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PAF
GA	68,5	14,4	5,9	0,1	2,2	1,3	2,1	3,9	0,8	0,1	0,5
GG	67,1	14,2	6,8	0,1	2,8	2,1	2,0	2,5	0,9	0,2	0,7
GR	68,4	13,2	7,2	0,1	2,3	2,2	2,0	2,0	0,9	0,2	0,4

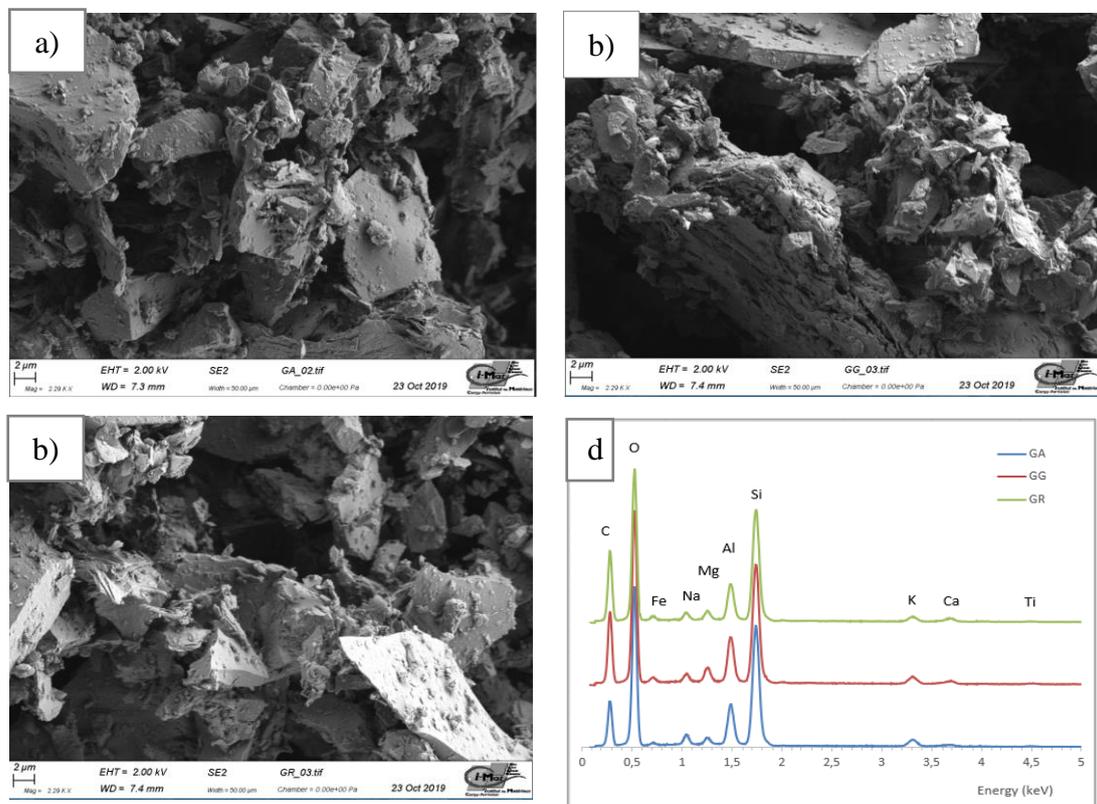


Figure III. 17 : Images MEB et spectres EDS des graviers GA, GG, GR

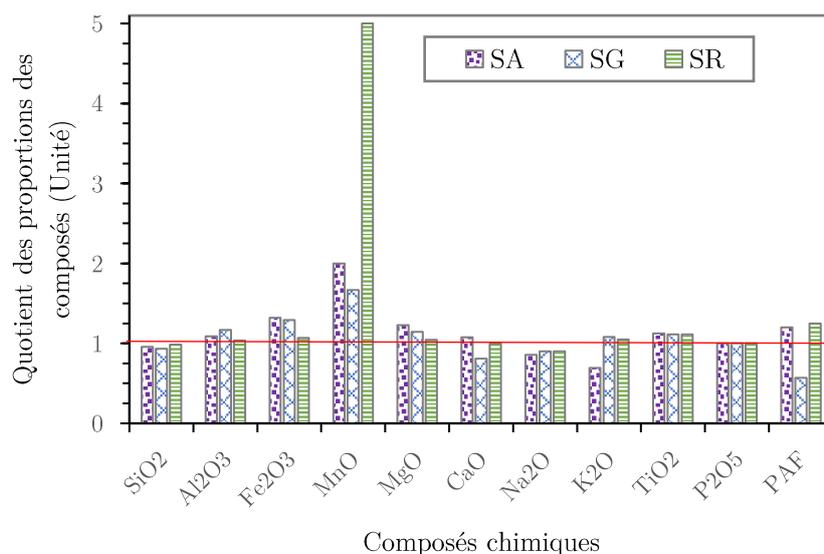


Figure III. 18 : Rapport de proportions des composés contenus dans le sable et dans les graviers de la même carrière.

On note une différence non significative entre les proportions des composés chimiques des gravillons et celles des sables de la même source minéralogique. Ces différences sont illustrées par les parties des bandes de l'histogrammes situées au-dessus et celles en dessous de la ligne correspondant à une unité. Les valeurs élevées pour l'oxyde de manganèse (MnO) n'ont pas une signification particulière car les proportions en MnO sont toutes inférieures à 0,5 % dans les sables et les graviers. Les problèmes d'échantillonnage et le type de matériau (mélange de tout venant) peuvent expliquer ces petites différences des proportions de composées chimiques dans les sables et les graviers. La similitude est également illustrée à travers les images MEB et spectres EDS de la figure III.13.

III.6.2 Composition minéralogique

L'analyse minéralogique DRX des gravillons a révélé la présence de mêmes phases minérales que celles des sables de la même carrière.

III.6.3 Caractéristiques physiques

III.6.3.1 Courbes granulométriques

Les résultats de l'analyse granulométrique des gravillons sont présentés dans le tableau III.15. La distribution dimensionnelle des grains des échantillons de gravier est présentée à travers les courbes granulométriques de la Figure III.19.

Tableau III. 15 : Analyse granulométrique par tamisage (% de passant) des gravillons

Diamètre tamis (mm)	GA	GG	GR
20	100	100	100
16	93,8	98,0	85,3
12,5	67,3	83,1	41,5
10	48,0	48,5	22,0
8,0	30,3	31,3	11,1
6,3	17,7	17,1	5,5
5	7,06	4,1	1,7
4	0	0,6	0
3	0	0	0

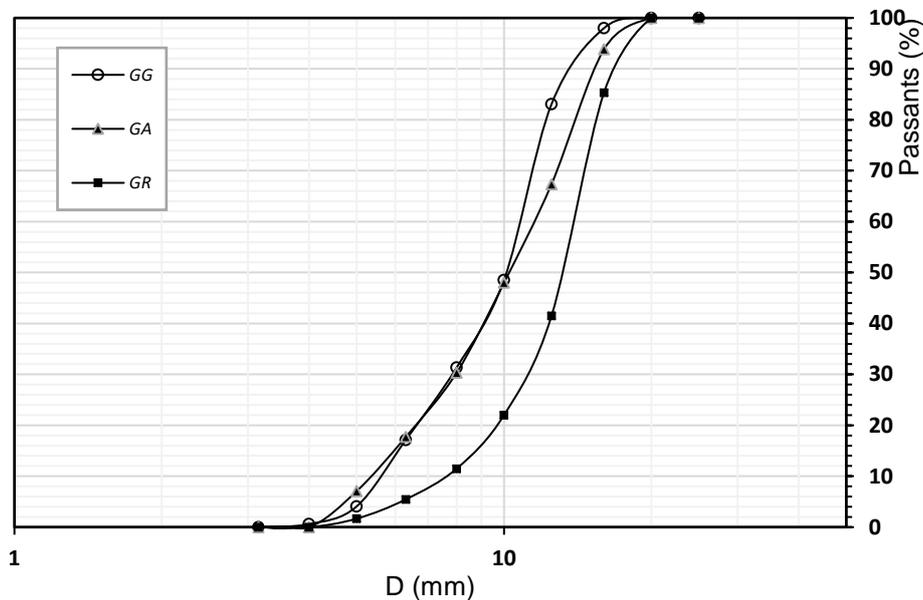


Figure III. 19 : Courbes granulométriques des graviers issus des trois carrières : GR, GA, GG.

Les résultats montrent que les graviers des trois carrières ont des distributions granulométriques comparables, étalées sur une plage allant de 4 à 16 mm.

III.6.3.2 Masse volumique et densités

Les valeurs de masse volumique et de densités (apparente et absolue) des gravillons des trois carrières sont consignés dans le tableau III.16.

Tableau III. 16 : Masse volumique et densités absolue et apparente des gravillons

Graviers	$\rho_{\text{Apparente}}$ (g/l)	ρ_{Absolue} (g/l)	$d_{\text{Apparente}}$	d_{Absolue}
GA	1592	2813	1,59	2,81
GG	1614	2845	1,61	2,84
GR	1655	2826	1,65	2,82

On observe de petites différences (quoi que non significatives) entre les valeurs des masses volumiques et densités absolues et apparentes des gravillons des trois carrières avec une valeur moyenne de densité apparente de 1,6 et absolue de 2,8.

III.6.4 Caractéristiques mécaniques

La résistance au choc des granulats est caractérisée par les coefficients Los Angeles (LA) dont les valeurs sont présentées au tableau III. 17.

Tableau III. 17 : Coefficient Los Angeles des graviers

Graviers	GA	GG	GR
LA	32	32	34

On note que les valeurs des coefficients LA sont similaires pour les trois granulats issus des carrières. L'étude montre que toutes les valeurs de LA sont inférieurs à 40, valeur limite recommandée pour les granulats destinés à la confection de bétons courants [NT 2130, 2002]. Ces granulats présentent ainsi une résistance à l'abrasion suffisante pour être utilisés dans la confection de bétons.

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les caractéristiques de base devant entrer dans la formulation de bétons et mortiers. Une analyse pétrographique des roches, une caractérisation physico-chimique et mécanique et une analyse minéralogique des granulats, ainsi qu'une analyse minéralogique du ciment provenant de la ville de Yaoundé, ont été effectuées.

Les résultats issus de ce travail de caractérisation permettront de mieux analyser l'influence du sable et des granulats issus des carrières sur le comportement des mortiers et bétons. Nous pouvons réaliser le bilan de ces caractérisations.

- L'observation en lame mince des échantillons de roches issus des trois carrières a confirmé qu'il s'agit de gisements de gneiss, avec des textures sensiblement différentes d'une carrière à l'autre.
- L'étude minéralogique du ciment CEM II/A 42,5 de la société Dangoté (Cameroun) a permis d'observer une forte teneur en silice ($\text{SiO}_2 > 25\%$) et une faible teneur en oxyde de calcium ($\text{CaO} < 50\%$), ce qui est caractéristique d'un ciment CEM II.
- Les analyses chimique et minéralogique ont montré que les sables de concassage ont une minéralogie similaire. Ces sables, bien que composés majoritairement de silice, ont une proportion élevée d'alumine et d'oxyde de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$). Ces proportions sont relativement importantes par rapport à celle du sable de rivière.

- L'analyse granulométrique des courbes a montré que tous les sables sont bien gradués, avec une granulométrie continue et bien répartie. Par ailleurs, les sables de concassage ont une granulométrie étalée tandis que le sable de rivière a une granulométrie serrée. En revanche, les granulométries des mélanges de 50 % de sable de rivière et de sable de carrière semblent bien graduées et étalées.
- L'étude a montré que les sables ont tous une valeur d'équivalent de sable supérieure à 82 %, traduisant un niveau élevé de propreté, mais présageant des risques de défaut de plasticité des bétons. Le sable de rivière présente la valeur la plus élevée, 96 %.
- Les valeurs de masse volumique et de coefficient d'absorption d'eau des granulats varient faiblement d'une carrière à l'autre. Toutefois, ces valeurs sont significativement différentes de celles du sable de rivière.
- Les sables de concassage semblent avoir une teneur en particules fines assez importante (en moyenne 5 fois plus) par rapport au sable de rivière ;
- Les gravillons ont une faible résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure, mais avec une valeur moyenne de coefficient Los Angeles de 33 %, inférieure à la limite recommandée et donc qualifiées pour être utilisées dans la confection de bétons.

De manière générale, on observe une similitude des caractéristiques des granulats des différentes carrières. Par contre, les caractéristiques des sables de concassage sont globalement différentes de celles du sable de rivière. Toutefois, les similitudes observées dans les sables de concassage permettent d'envisager une similitude de caractéristiques mécaniques des bétons. Les propriétés mécaniques des bétons confectionnés avec ces sables et gravillons sont présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV. CARACTERISATIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES MORTIERS ET BETONS

IV.1 INTRODUCTION

Au chapitre précédent, nous avons présenté les résultats de caractérisation des matières premières : ciment, eau et granulats issus des trois carrières, ainsi que du sable de rivière. L'analyse a révélé que les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des sables des trois carrières sont comparables, mais différentes de celles du sable de rivière. Nous proposons dans ce chapitre de présenter les résultats de caractérisation physiques et mécaniques des bétons et mortiers.

Dans un premier temps, les données de compositions de mortiers et bétons, suivies par les résultats de caractérisation des bétons à l'état frais sont présentées. Les tests réalisés à l'état frais sont l'affaissement au cône d'Abrams, l'étalement à la table à secousses, la compacité et la masse volumique. Par la suite, nous présentons les résultats des essais sur les bétons à l'état durci : la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité statique et dynamique, la masse volumique, la porosité accessible à l'eau, le retrait et la conductivité thermique. Enfin, les résultats des essais de caractérisation des mortiers seront présentés (masses volumiques, résistances à la compression et à la flexion, retrait et perte de masse, porosité accessible à l'eau).

IV.2 COMPOSITION DE BETONS ET MORTIERS

IV.2.1 Composition de bétons

Afin de mieux évaluer l'influence du sable de carrière sur les propriétés du béton, différentes formulations de bétons sont réalisées, en utilisant les granulats issus des trois carrières (Arab Contractor, Gracam et Razel) et le sable de rivière. Le sable de rivière est remplacé par le sable de concassage dans les proportions de 100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 50 % et 0 %. Les compositions pour 1 m³ de mélange de béton sont consignées dans le tableau IV.1. La nomenclature relative se présente comme suit : B (béton), S (sable), la lettre suivante (A, G ou R) désigne la carrière et le nombre (100, 90, 80, 70, 50 ou 0) désigne la proportion correspondante de sable de concassage contenue dans le mélange. Pour toutes les formulations, le dosage en ciment et le rapport eau/ciment (E/C) sont constants, respectivement 350 kg/m³ et 0,6.

Tableau IV. 1 : Compositions des bétons (pour 1 m³ de béton)

Carrières	Mélanges granulaires	Ciment (kg)	Eau (kg)	Sable de rivière (kg)	Sable de carrière (kg)	Graviers (kg)
Granulats Arab Contractor	BSA100 :100%SA-GA	350	206	0	683	1176
	BSA90 :90% SA+10%SS-GA	350	206	64	634	1156
	BSA80 :80% SA+20%SS-GA	350	206	128	559	1161
	BSA70 :70% SA+30%SS-GA	350	206	210	479	1152
	BSA50 :50% SA+50%SS-GA	350	206	343	343	1148
	BSA0 :100 % SS-GA	350	206	663	0	1156
Granulats Gracam	BSG100 : 100%SG : GG	350	206	0	725	1198
	BSG90 : 90% SG+10%SS-GG	350	206	69	689	1157
	BSG80 : 80% SG+20%SS-GG	350	206	151	584	1167
	BSG70 : 70% SG+30%SS-GG	350	206	210	518	1165
	BSG50 : 50% SG+50%SS-GG	350	206	349	349	1177
	BSG0 : 100 % SS-GG	350	206	658	0	1175
Granulats Razel	BSR100 : 100%SA-GR	350	206	0	730	1189
	BSR90 : 90% SA+10%SS-GR	350	206	67	666	1175
	BSR80 : 80% SA+20%SS-GR	350	206	153	585	1160
	BSR70 : 70% SA+30%SS-GR	350	206	233	508	1148
	BSR50 : 50% SA+50%SS-GR	350	206	354	353	1167
	BSR0 : 100 % SS-GR	350	206	671	0	1160

VI.2.2 Compositions de mortiers de béton équivalent (MBE)

Les mortiers sont élaborés à base des formulations de bétons, en maintenant le même volume de la pâte de ciment et en remplaçant le volume granulaire par du sable. Pour la formulation des mortiers, nous nous sommes limités aux combinaisons suivantes : mélanges de 100 %, 50 % et 0 % de sable de chaque carrière et de sable de rivière.

La nomenclature des mortiers se présente comme suit : M (mortier), S (sable), la lettre suivante (A, G ou R) désigne la carrière et le nombre (100, 50 ou 0) désigne la proportion correspondante de sable de carrière. Le tableau IV.2 présente les valeurs des compositions pour 1 m³ de mortier.

Tableau IV. 2 : Compositions de mortiers

Carrières	Mélanges	Ciment (kg)	Eau (kg)	Sable rivière (kg)	Sable de carrière (kg)
Sable Sanaga	MSS100: 100%SS	350	206	1771	0
Arab Contractor	MSA50: 50%SA+50%SS	350	206	909	910
	MSA100: 100%SA+0%SS	350	206	0	1866
Gracam	MSG50: 50%SG+50%SS	350	206	929	930
	MSG100: 100%SG+0%SS	350	206	0	1948
Razel	MSR50: 50%SR+50%SS	350	206	918	918
	MSR100: 100%SR+0%SS	350	206	0	1900

IV.3 CARACTERISTIQUES DES BETONS A L'ETAT FRAIS

IV.3.1 Affaissement au cône d'Abrams

La figure IV.1 présente les variations de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction des proportions de substitution de sable de carrière du mélange du béton.

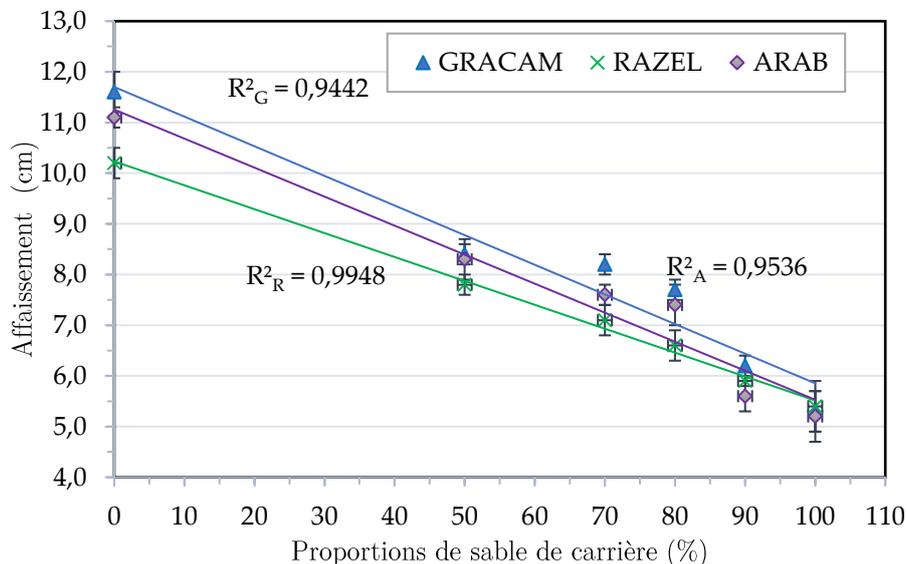


Figure IV. 1 : Évolution de l'affaissement en fonction de la proportion de sable de carrière

La figure IV.I montre une baisse progressive de l'affaissement en fonction de la proportion de sable de carrière. Les compositions de béton (BSA0, BSG0 et BSR0) contenant uniquement le sable de rivière présentent un affaissement au cône d'Abrams variant entre 10 et 15 cm ce qui correspond à un béton très plastique (Classe S3). Avec les différentes substitutions de sable de rivière, cette plasticité diminue et quel que soit le taux de

substitution obtenu, l'affaissement varie entre 5 et 9 cm (Classe S2). Cette baisse de plasticité des bétons contenant du sable de carrière peut être liée à la forme angulaire et la morphologie des grains concassés par rapport au sable de rivière (dont les grains sont arrondis).

De plus, les analyses de mesure de teneur en particules fines ont montré une teneur élevée en fines du sable de carrière par rapport au sable de rivière. La différence d'ouvrabilité entre les bétons de sable de rivière et de cocktail de sables est fortement liée à la teneur en fines. En formulant les bétons contenant du sable de carrière, le volume de la pâte cimentaire est resté constant en gardant un même volume d'eau et de ciment. L'objectif de ce travail est d'analyser l'influence du sable de carrière sur les propriétés du béton à l'état frais. Une quantité d'eau supplémentaire ou l'utilisation d'un plastifiant serait nécessaire dans le but de garder une ouvrabilité constante. Cependant, pour les bétons BSA50, BSG50 et BSR50, nous avons un affaissement global proche de 8 cm, valeur fixée en hypothèse. Les études menées par certains chercheurs [Kou and Poon, 2009 ; Melais and Achoura, 2011 ; Akrouf, K. et al., 2010, Nanda et al., 2010] aboutissent à un pourcentage de substitution optimal de 50 % de sable de carrière. Ces études ont montré qu'au-delà de cette proportion, l'affaissement et la maniabilité commencent à diminuer.

IV.3.2 Etalement à la table à secousses

Afin de mieux confirmer les propriétés d'ouvrabilité mesurées par l'affaissement au cône d'Abrams, l'essai d'étalement à la table à secousses a été réalisé pour les différentes formulations de bétons. Les valeurs de l'étalement des bétons sont rapportées dans le tableau IV.3. Les données présentées sont les résultats sur une série de deux essais.

Tableau IV. 3 : Etalement des bétons au tronc de cône

Proportion de sable de carrière	Etalement (cm)		
	Arab Contractor	Gracam	Razel
100 %	30,5	29,3	28,5
90 %	31,0	30,2	29,0
80 %	31,5	31,3	30,0
70 %	32,0	32,5	31,5
50 %	32,0	33,1	32,4
0 %	33,0	34,0	33,5

L'analyse montre que l'étalement de bétons de sable de rivière est grand par rapport à celui de sable de concassage, et diminue à mesure que les proportions de sable de concassage du mélange augmentent. Cette diminution est de 8,2 % (entre les bétons BSA0 et BSA100), de 17,2 % (entre les bétons BGA0 et BGA100), et de 17,5 % (entre les bétons BRA0 et BRA100). Plus le béton contient du sable de concassage, plus la valeur de l'étalement est faible. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus à

l'affaissement au cône d'Abrams et confirment le besoin d'eau supplémentaire dans les formulations de bétons contenant plus de sable de concassage. [Nanda et al., 2010], [Roesler et al., 2012], [Bederina et al., 2013].

IV.3.3 Compactabilité

La compactabilité peut être définie comme l'aptitude du béton frais à se mettre en place dans un moule donné, selon un procédé donné [De Larrard, 1999]. La figure IV.2 présente l'évolution de la comptabilité moyenne du béton en fonction des proportions de sable de concassage.

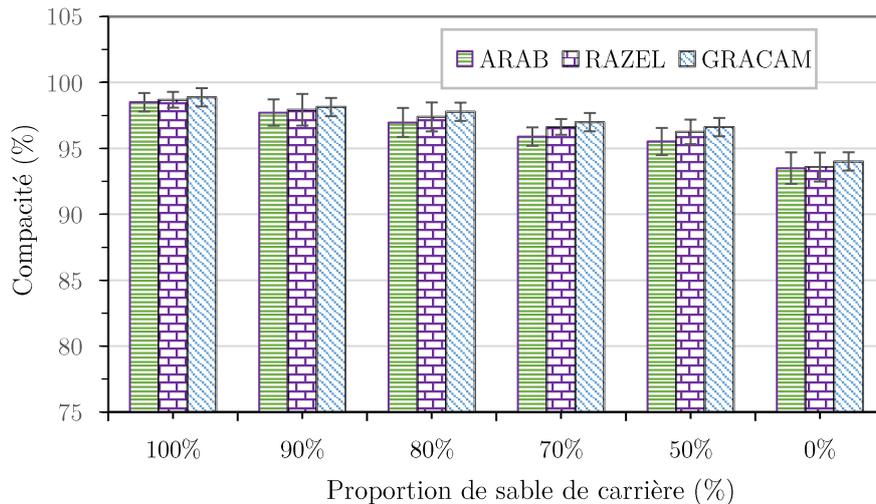


Figure IV. 2 : Variation de la compacité en fonction de la proportion de sable de concassage

Les résultats montrent que les valeurs de compactabilité de bétons varient très peu suivant les carrières pour une proportion donnée. La compatibilité augmente en fonction de la proportion de sable de carrière dans le mélange. Elle varie entre 94 % (pour un les bétons composés uniquement de sable de rivière) et 99 % (pour les bétons composés uniquement du sable de carrière). Les résultats de teneur en particules fines ont montré une teneur en fines beaucoup plus importante dans le sable de carrière que dans le sable de rivière. La présence de particules fines semble améliorer la compacité mais diminue l'ouvrabilité à volume de pâte cimentaire constant. Cette observation a été faite aussi par certains auteurs sur l'analyse comparée de bétons ordinaires contenant du sable de rivière et de sable de carrière [Kearsley and Wainwright, 2002; Sedran et al., 1994]. La figure IV. 3 illustre l'évolution de la compacité en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.

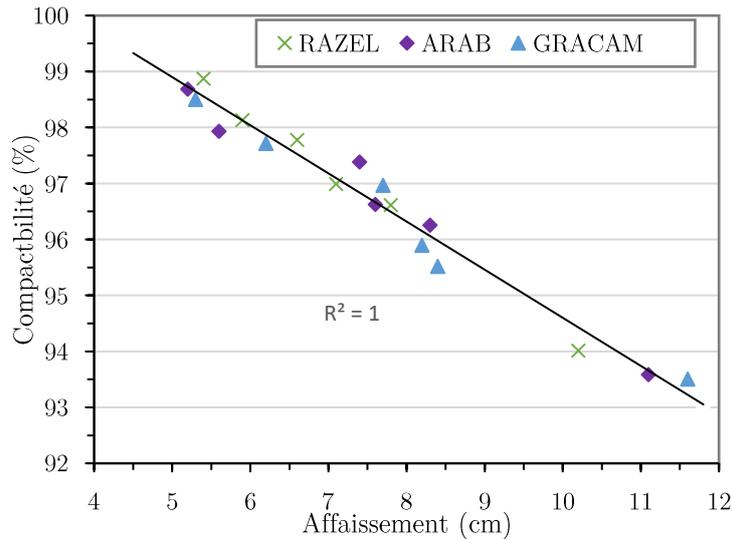


Figure IV. 3 : variation de la compacité en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams

L'analyse montre une bonne corrélation entre la compactabilité du béton et l'affaissement au cône d'Abrams (avec un coefficient de corrélation linéaire supérieur à 0,96). Cette corrélation est vérifiée avec les granulats de toutes les carrières. Plus la compacité est grande, plus l'affaissement au cône d'Abrams est faible. Ces résultats approuvent ainsi le fait que le sable de concassage a une influence sur l'ouvrabilité et la consistance du béton frais. Une modification de la formulation par un apport en eau ou l'utilisation d'un fluidifiant serait nécessaire pour garder la même ouvrabilité.

IV.4 PROPRIETES DES BETONS A L'ETAT DURCI

Dans cette section, les résultats des propriétés mécaniques et physiques seront présentés.

IV.4.1 Propriétés mécaniques

IV.4.1.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée aux échéances de 7 jours, 21 jours et 28 jours. Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau IV.4. La figure IV.4 montre l'évolution de la résistance moyenne à la compression de toutes les compositions de béton. Les figures IV. 5 (a, b et c) montrent l'évolution de résistance de chacune des carrières respectivement Arab Contractor, Gracam et Razel.

Tableau IV. 4 : Valeurs (en MPa) de la résistance à la compression des bétons à 7, 21 et 28 jours.

Proportion de mélanges	Nomenclature des bétons		7	21	28
100%	BSR100	Valeur moyenne	19,8	21,6	24,9
		Ecart type	0,5	1,3	1,1
	BSA100	Valeur moyenne	19,5	22,4	23,6
		Ecart type	1,2	1,1	1,3
	BSG100	Valeur moyenne	19,4	21,3	23,9
		Ecart type	0,8	0,6	1,2
90%	BSR90	Valeur moyenne	19,6	21,6	25,2
		Ecart type	1,0	0,8	0,5
	BSA90	Valeur moyenne	18,1	21,1	23,3
		Ecart type	0,8	0,9	0,2
	BSG90	Valeur moyenne	17,6	19,3	23,2
		Ecart type	1,0	1,1	1,0
80%	BSR80	Valeur moyenne	19,2	20,9	24,4
		Ecart type	0,7	0,9	0,4
	BSA80	Valeur moyenne	17,6	20,6	21,6
		Ecart type	0,4	1,3	1,3
	BSG 80	Valeur moyenne	18,2	19,6	22,2
		Ecart type	0,3	0,5	0,6
70%	BSR70	Valeur moyenne	19,0	19,8	23,8
		Ecart type	1,1	1,0	1,1
	BSA70	Valeur moyenne	17,6	20,1	22,7
		Ecart type	1,3	0,9	0,8
	BSG70	Valeur moyenne	17,9	19,2	22,4
		Ecart type	0,4	0,4	0,5
50%	BSR50	Valeur moyenne	20,2	23,2	25,5
		Ecart type	0,8	0,7	0,3
	BSA50	Valeur moyenne	20,4	24,0	26,2
		Ecart type	1,2	0,8	0,9
	BSG50	Valeur moyenne	19,7	22,4	25,5
		Ecart type	0,8	0,3	0,4
0%	BSR0	Valeur moyenne	20,2	23,5	26,8
		Ecart type	1,1	1,0	1,1
	BSA0	Valeur moyenne	20,6	24,7	28,4
		Ecart type	0,7	0,5	0,3
	BSG0	Valeur moyenne	19,9	23,7	26,9
		Ecart type	0,9	0,6	0,5

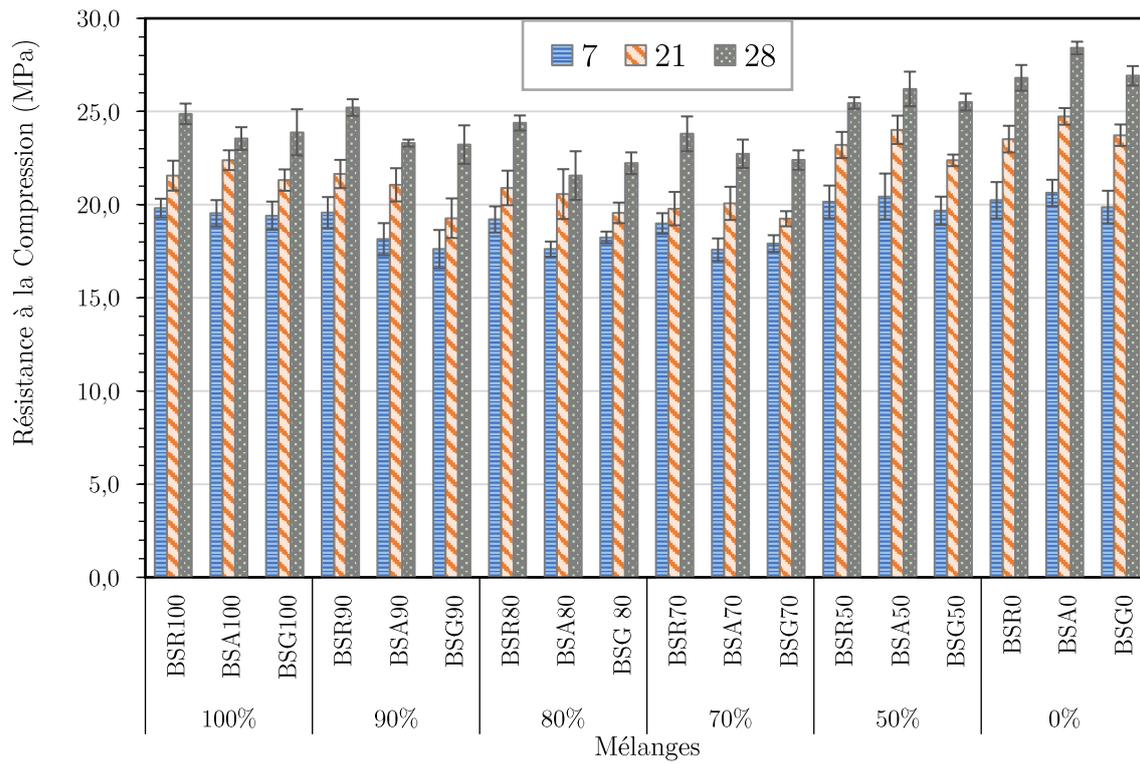
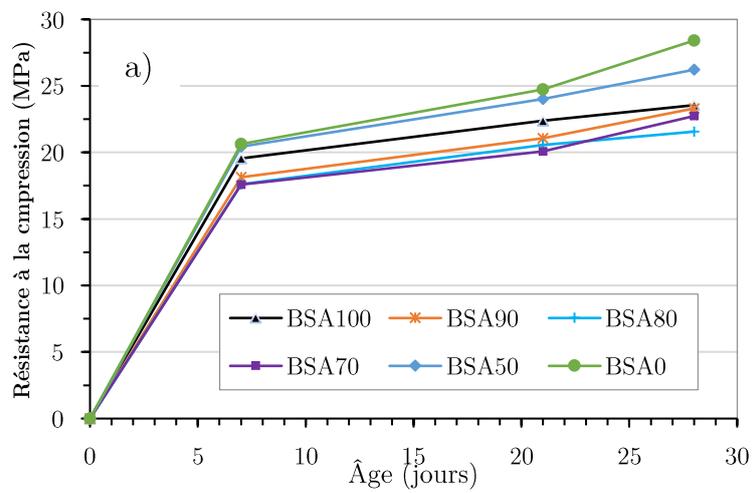


Figure IV. 4 : Résistances à la compression des bétons.



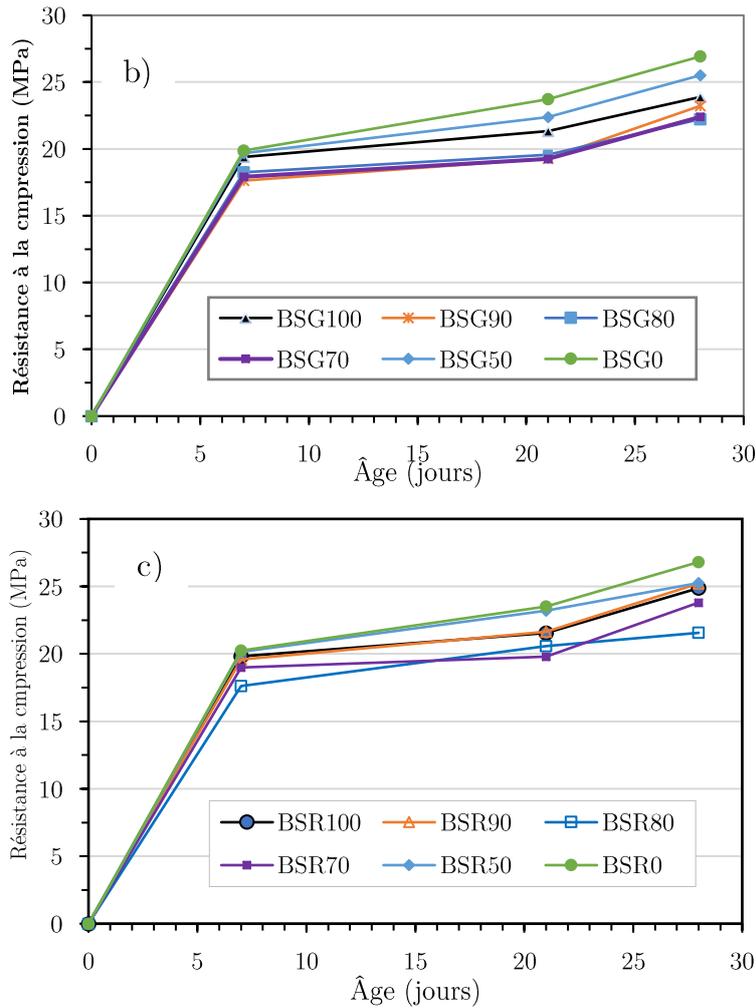


Figure IV. 5 : Evolution de la résistance à la compression des carrières Arab Contractor (a), Gracam (b) et Razel (c).

Les bétons contenant uniquement le sable de rivière présentent des résistances à la compression presque identiques à 7 jours. Cela est observé pour les résistances obtenues à 21 et 28 jours.

Avec la substitution du sable de rivière par le sable de carrière, une légère baisse de résistance s'observe pour les proportions de 70 %, 80 % et 90 % pour les mesures à 28 jours de cure. Les bétons contenant les proportions de 50 % et 100 % de sable de carrière présentent des résistances proches des bétons contenant uniquement le sable de rivière. L'origine des granulats n'a aucune influence sur les résultats obtenus.

Pour les 7^{ème} et 21^{ème} jour, on note une augmentation disparate de la résistance à la compression des différentes formulations. Cette augmentation oscille entre 14,2 % à 19,9 % pour les bétons de la carrière Arab Contractor (la plus petite valeur étant de 20,1 MPa (BSA70), la plus grande valeur étant 24,7 MPa (BSA0) ; figure 5a). Pour les bétons de la carrière Gracam, l'augmentation varie de 7,2 % à 19,4 % (la plus petite valeur étant de 19,8 MPa (BSG70), la plus grande valeur étant 23,7 MPa (BSG0) ; figure 5b). L'augmentation varie de 4,19 % à 16,22 % pour les bétons des granulats de la carrière

Razel (la plus petite valeur étant de 19,7 MPa (BSR70), la plus grande valeur étant 23,5 MPa (BSR0), figure 5c).

À 28 jours, les plus grandes valeurs de résistance à la compression sont obtenues pour les bétons composés uniquement de sable de rivière (BSA0, BSG0, SGR0). Les valeurs obtenues avec les bétons de 50 % de mélange des deux sables (BSA50, BSG50, SGR50) sont proches de celles à 100 % de sable de rivière. Pour tous ces bétons, la résistance à la compression est supérieure à 25 MPa (résistance visée en hypothèse de formulation). Cependant, les valeurs de résistance à la compression restent insuffisantes pour un béton de classe C25/30.

L'étude révèle globalement une diminution non significative des valeurs de la résistance à la compression entre les bétons BSA0 et BSA50, BSG0 et BSG50, BSR0 et BSR50 de l'ordre de 5,1 %, 1,1 %, 1,7 % respectivement. En outre, on observe que le remplacement de 70 %, 80 %, 90 % et 100 % du sable de rivière par du sable concassé influe très peu sur les valeurs de résistance à la compression du béton par rapport à un béton conventionnel avec du sable de rivière. D'autre part, les résultats obtenus diffèrent légèrement de ceux de Luc Leroy et al., [Luc Leroy et al., 2017], qui ont montré que le remplacement du sable de rivière par 75 % de sable concassé présentait des valeurs de résistance plus élevées à 28 jours. Les résultats obtenus viennent ainsi compléter ceux de la littérature et permettent de souligner la faisabilité de la valorisation de l'utilisation de sable de concassage dans la formulation de bétons.

IV.4.1.2 Résistance à la traction par fendage

Les valeurs de résistance à la traction par fendage des différents bétons sont consignées dans le tableau IV.5. La figure IV. 6 présente l'évolution de la résistance moyenne à la traction par fendage à 7, 21 et 28 jours des bétons formulés avec les granulats des trois carrières. L'évolution de ces valeurs de résistance à la traction des bétons confectionnés est représentée sur les figures IV. 7 (a, b et c) respectivement pour les agrégats des carrières Arab Contractor, Gracam et Razel.

Tableau IV. 5 : Valeurs de résistance à la traction par fendage des différents bétons étudiés.

Proportions	Mélanges	Résistance (MPa)	Âge du béton (jours)		
			7	21	28
100 %s	BSA100	Valeur	2,3	2,7	3,2
		Ecart type	0,1	0,2	0,1
	BSG100	Valeur	2,6	2,8	3,1
		Ecart type	0,2	0,1	0,2
	BSR100	Valeur	2,4	3,1	3,4
		Ecart type	0,2	0,1	0,3
90 %	BSA90	Valeur	2,1	2,7	3,1
		Ecart type	0,2	0,2	0,1
	BSG90	Valeur	2,5	2,8	3,1
		Ecart type	0,2	0,2	0,1
	BSR90	Valeur	2,3	2,8	3,2
		Ecart type	0,3	0,3	0,3
80 %	BSA80	Valeur	2,1	2,6	3,1
		Ecart type	0,2	0,2	0,1
	BSG80	Valeur	2,5	2,6	2,9
		Ecart type	0,1	0,3	0,3
	BSR80	Valeur	2,3	2,9	3,2
		Ecart type	0,3	0,3	0,3
70 %	BSA70	Valeur	2,0	2,6	2,9
		Ecart type	0,1	0,2	0,2
	BSG70	Valeur	2,4	2,5	2,8
		Ecart type	0,1	0,2	0,2
	BSR70	Valeur	2,4	3,0	3,3
		Ecart type	0,1	0,1	0,1
50%	BSA50	Valeur	2,3	2,9	3,2
		Ecart type	0,2	0,2	0,1
	BSG50	Valeur	2,7	2,8	3,2
		Ecart type	0,3	0,2	0,2
	BSR50	Valeur	2,6	3,1	3,6
		Ecart type	0,2	0,1	0,11
0%	BSA0	Valeur	2,4	2,8	3,2
		Ecart type	0,2	0,2	0,2
	BSG0	Valeur	2,7	2,9	3,3
		Ecart type	0,2	0,1	0,1
	BSR0	Valeur	2,6	3,3	3,7
		Ecart type	0,2	0,1	0,1

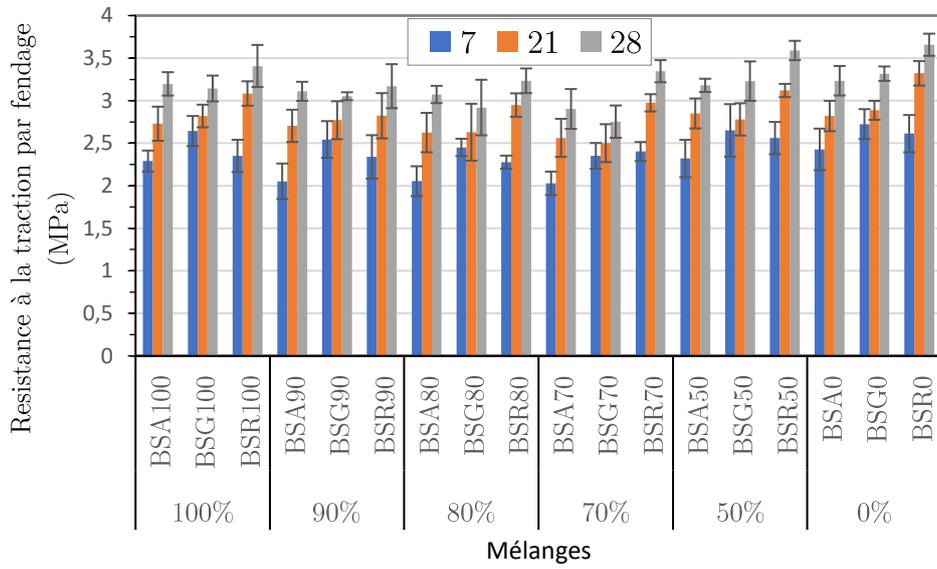
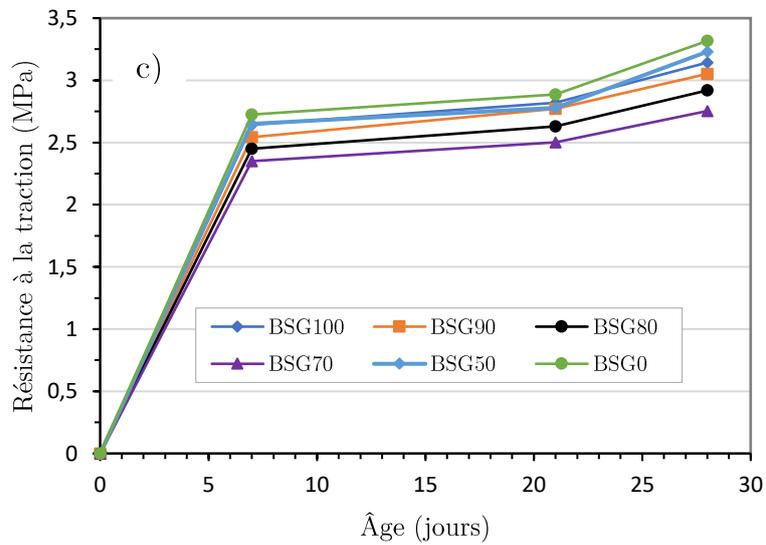
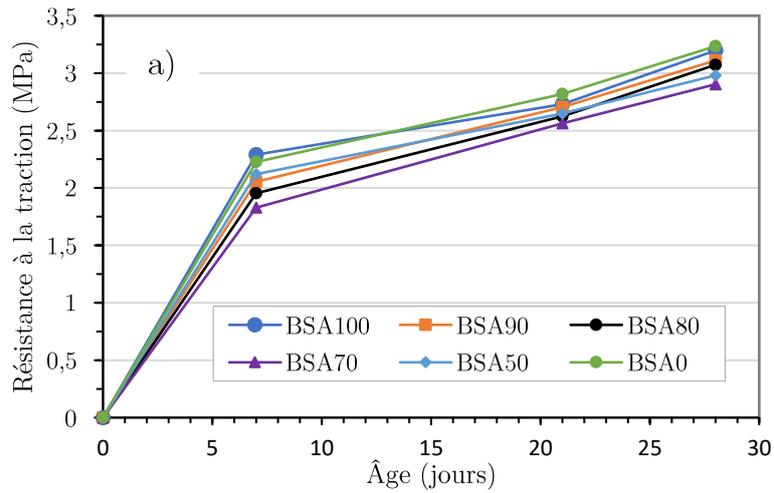


Figure IV. 6 : Valeurs de la résistance à la traction par fendage des bétons



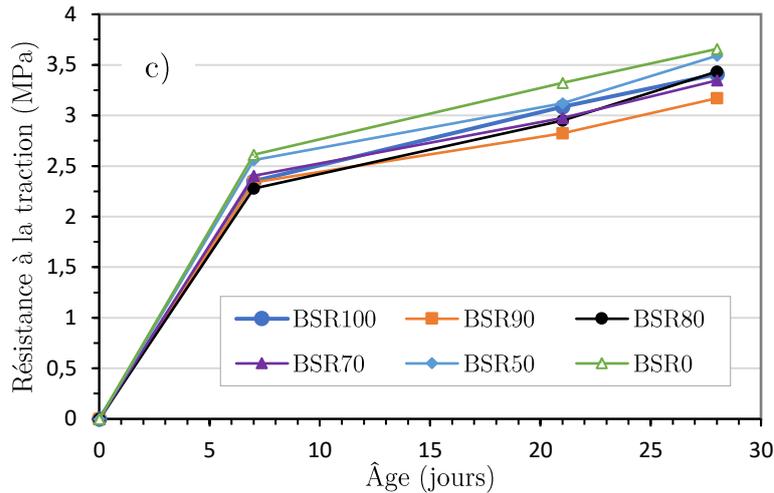


Figure IV. 7 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des bétons avec mélanges de sables Arab Contractor (a), Gracam (b) et Razel (c).

Tout comme pour la résistance à la compression, les bétons contenant uniquement le sable de rivière présentent de manière globale les valeurs les plus élevées de résistance pour une sollicitation en traction. Les résultats montrent que les valeurs de la résistance à la traction par fendage varient de 1,83 MPa (BSA70 à 7j) à 3,66 MPa (BSR0 à 28 j). Du 7^{ème} au 21^{ème} jour, l'évolution semble plus importante pour les bétons de la carrière Arab Contractor et oscille entre 19,17 % et 40,17 % (la plus petite valeur étant de 2,56 MPa (BSA70), la plus grande valeur étant 2,81 MPa (BSA0) ; figure 9a). Pour les bétons de la carrière Gracam, nous avons par contre enregistré une faible augmentation dont la variation est de 4,51 % à 8,88 % (la plus petite valeur étant de 2,82 MPa (BSG70), la plus grande valeur étant 3,32 MPa (BSG0) ; figure 9b). L'augmentation varie de 20,68 % à 31,23 % pour les bétons des granulats de la carrière Razel (la plus petite valeur étant de 2,50 MPa (BSR70), la plus grande valeur étant 2,88 MPa (BSR0), figure 9c). À 28 jours, nous observons une faible variation des résultats de résistance à la traction de toutes les formulations. Les valeurs varient entre 2,75 MPa (BSG70) et 3,65 MPa (BSR0). Tout comme pour la résistance à la compression, l'étude révèle que la valorisation du sable de concassage est possible et ne modifie pas drastiquement les résistances en traction.

IV.4.1.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction

Une analyse est menée sur le niveau de corrélation entre les valeurs des résistances à la compression et à la traction des bétons formulés. Les figures IV.8, 9 et 10 présentent les variations de la résistance à la traction du béton en fonction de la résistance à la compression pour toutes les échéances (7^{ème}, 21^{ème} et 28^{ème} jours), respectivement pour les bétons composés avec les granulats des carrières A, G et R.

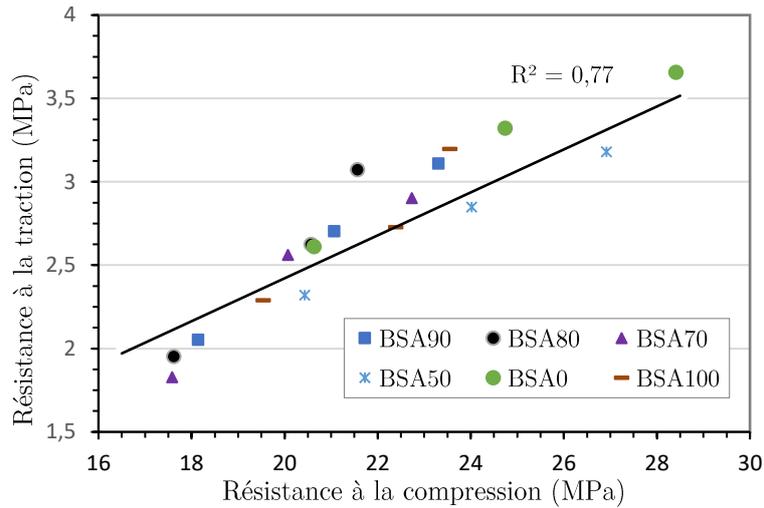


Figure IV. 8 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les bétons de granulats de la carrière Arab Contractor

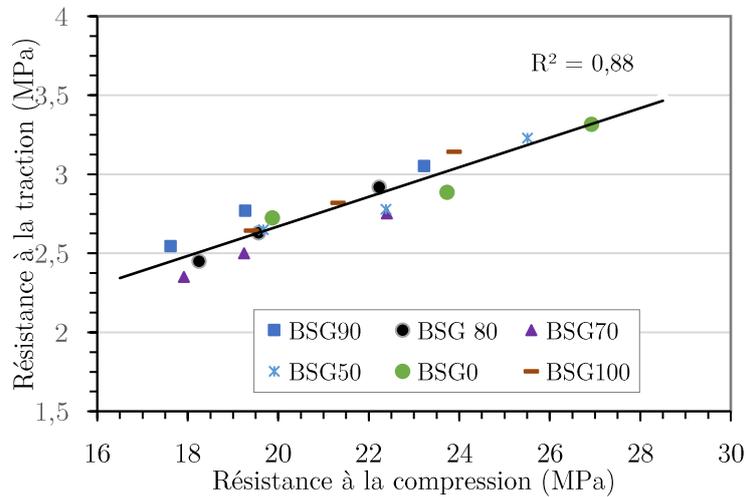


Figure IV. 9 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les bétons de granulats de la carrière Gramam

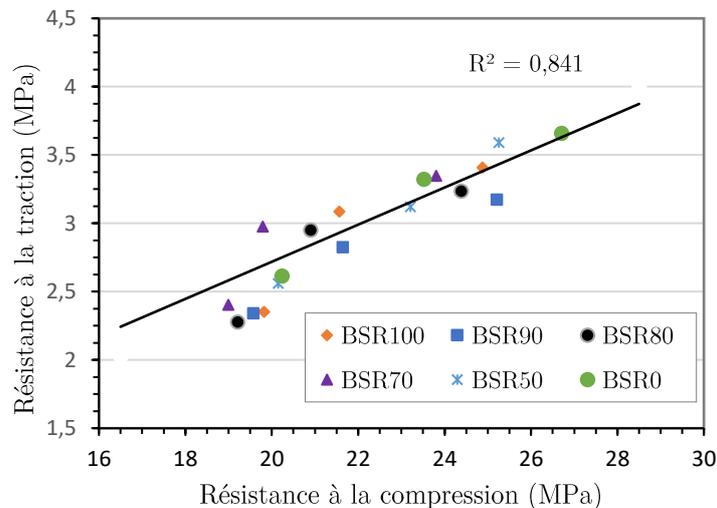


Figure IV. 10 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les bétons de granulats de la carrière Razel

Pour chacune des formulations prise à part, l'analyse montre une bonne corrélation entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression entre le 7^e et le 28^e jour (avec des coefficients de corrélation tous supérieurs à 0,94). Après regroupement des résultats par carrière, la corrélation devient légèrement plus faible, avec un coefficient de corrélation de 0,77 (A), 0,88 (G), 0,84 (R).

Cette baisse des coefficients de corrélation peut s'expliquer par le fait que, contrairement à la résistance à la compression, le sable de concassage n'affecte pas significativement la résistance à la traction par fendage. En effet, la résistance à la traction du béton est très affectée par la zone de transition interfaciale entre le granulat et la matrice de ciment, la variabilité de la texture de surface du sable de concassage était probablement la principale raison à l'origine de la variation de ces résultats [Kou and Poon, 2009]. Au final, les résultats obtenus des résistances la compression et à la traction par fendage ont montré que seuls les bétons composés de 50 % de sable de carrière et ceux composés uniquement de sable de rivière ont des caractéristiques mécaniques intéressantes.

De ce fait, dans la suite de l'étude, outre l'études des déformations de retrait de séchage (qui sera réalisée sur des bétons composés de 100 % de sable de rivière et ceux composés de 100 % de sable de carrière), tous les autres essais ont été réalisés sur les bétons composés de 50 % de sable de concassage et ceux à 100 % de sable de rivière.

IV.4.1.4 Module statique du béton

Compte tenu de l'évolution de la résistance à la compression en fonction du volume de substitution du sable de carrière, la mesure du module statique est effectuée sur des bétons contenant uniquement du sable de rivière et 50 % de substitution. Les granulats utilisés sont ceux issus des carrières Gracam et Razel. La figure IV.11 présente l'évolution de la contrainte de compression en fonction du déplacement mesuré des bétons BSG0, BSG50, BSR0 et BSR50. Les essais ont été réalisés au bout de 90 jours de cure dans l'eau et les résistances obtenues sur deux éprouvettes sont résumées dans le tableau IV.6.

L'analyse comparée des résultats de résistance à la compression entre 28 et 90 jours montre que la résistance à la compression n'est pas significativement différente pour les bétons à 50 % de mélange et ceux à 100 % de sable de rivière. Tous les bétons sont dans la même classe de résistance C25/30.

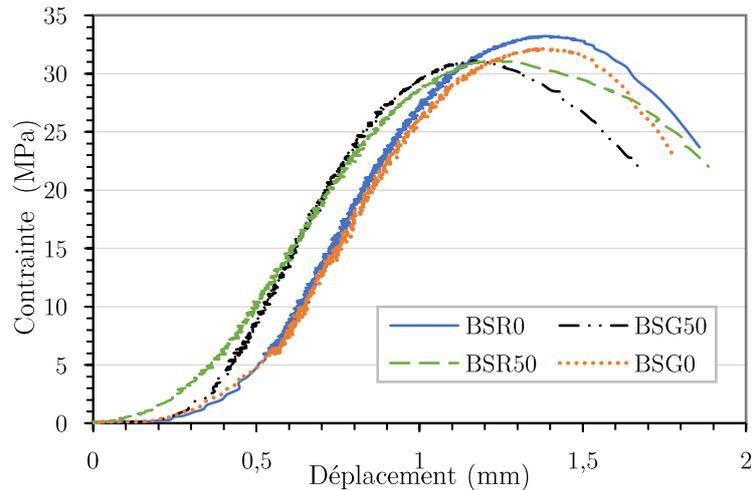


Figure IV. 11 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du déplacement

Tableau IV. 6 : Valeurs de la résistance à la compression des bétons

Mélanges	BSG0	BSG50	BSR0	BSR50
Résistance à la compression (MPa)	32.1 ± 1.0	31.1 ± 0.5	33.2 ± 1.3	31.1 ± 0.6

Le module d'élasticité a été déterminé à partir de la pente de la courbe contrainte/déformation pour des contraintes comprises entre 7 MPa et 30 % de la contrainte à la rupture des différents bétons. La figure IV. 12 présente les courbes de contrainte/déformation, ainsi que des droites d'ajustement linéaire correspondantes. Le tableau IV.7 présente les valeurs du module d'élasticité.

Les valeurs moyennes du module d'élasticité statique des bétons BSG0 et BSR0 étaient de 22,0 GPa et 23,7 GPa pour les bétons BSG50 et BSR50, ce qui correspond à une faible diminution relative de 5,8 % de la valeur du module d'élasticité du béton conventionnel. La présence de sable de carrière n'a pas un impact remarquable sur cette propriété du béton : la proportion de 50 % permet un maintien de la valeur du module statique.

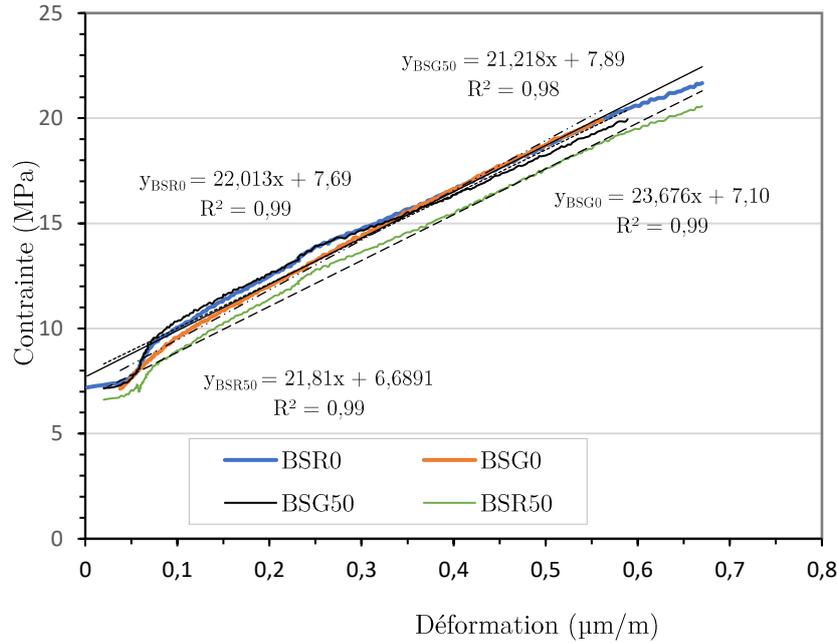


Figure IV. 12 : Courbes contraintes-déformations des bétons

Tableau IV. 7 : Valeurs du module d'élasticité linéaire des bétons

Mélanges	BSG0	BSG50	BSR0	BSR50
Module d'élasticité statique E (GPa)	22.0 ± 0.7	21.2 ± 0.3	23.7 ± 0.9	21.8 ± 0.2

En résumé de cette section, nous pouvons dire que les bétons formulés avec 50 % de mélange et ceux formulés avec 100 % de sable de rivière semblent avoir des propriétés mécaniques similaires (faible écart entre les valeurs). Ces résultats sont observés avec les granulats des trois carrières.

IV.4 2 Propriétés physiques du béton

IV.4.2.1 Retrait de séchage

L'évolution des déformations liées au retrait de séchage au jeune âge des bétons de 100 % de sable concassé et des bétons de 100 % de sable de rivière est illustrée à la figure IV.13.

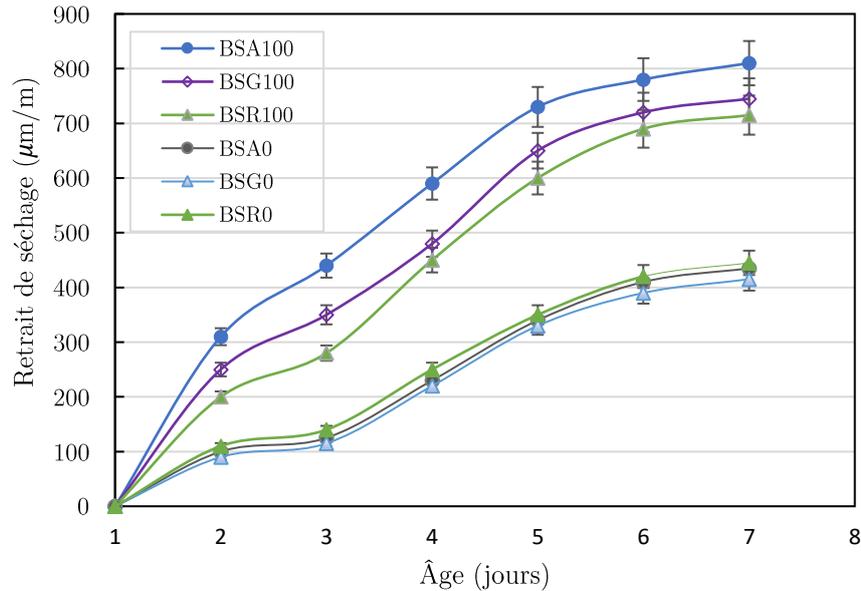


Figure IV. 13: Evolution du retrait de séchage des bétons étudiés

Les résultats montrent que le retrait augmente très rapidement dans les deux premiers jours pour tous les bétons contenant du sable de carrière, ce qui indique que l'équilibre hydrique n'est pas atteint.

La figure montre deux groupes distincts de courbes d'évolution du retrait, avec des valeurs élevées pour le béton avec 100 % de sable concassé par rapport au béton avec 100 % de sable de rivière. Cette différence peut s'expliquer par le niveau élevé de fines dans les sables concassés (environ 7,4 % pour le sable concassé contre 1,4 % pour le sable de rivière), ce qui est différent du résultat de Kou et al [Kou and Poon, 2009]. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la taille des particules du sable de rivière est généralement plus grande que celle du sable concassé de gneiss, contrairement au sable concassé de granite utilisé par Kou et al. En général, un échantillon de granulats ayant une taille de particules plus importante entraîne un retrait plus faible du béton produit [Imamoto and Arai, 2008 ; Limbachiya and Kew, 2008]. En effet, l'évaporation est accélérée dans la phase initiale du béton et par le rapport eau/ciment élevé [Xuan et al., 2017]. Le rétrécissement des dimensions peut s'expliquer par le séchage de l'eau libre dans les interstices du béton, laissant un fin réseau de pores de différentes tailles. Des tensions capillaires se créent sur les faces des pores de diamètres fins, ce qui entraîne une contraction du volume du béton.

IV.4.2.2 Masse volumique et porosité accessible à l'eau

Les résultats de la masse volumique et de la porosité accessible à l'eau des bétons correspondants à 50 % et 0 % de substitution de sable concassé sont consignés dans le tableau IV.8. Les valeurs de la masse volumique théorique calculées à partir du tableau IV.1 sont également renseignées. La figure IV. 14 illustre l'évolution des deux propriétés.

Tableau IV. 8 : Valeurs de Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente des différents bétons

Mélanges	BSA0	BSA50	BSG0	BSG50	BSR0	BSR50
Masse volumique (kg/m ³)	2321	2392	2345	2412	2341	2403
Ecart type	20	14	21	15	12	14
Masse volumique théorique (kg/m ³)	2305	2343	2320	2361	2303	2360
Porosité (%)	14,9	13,1	15,4	13,4	15,2	13,2
(Ecart type)	0,4	0,7	0,3	0,6	0,4	0,9

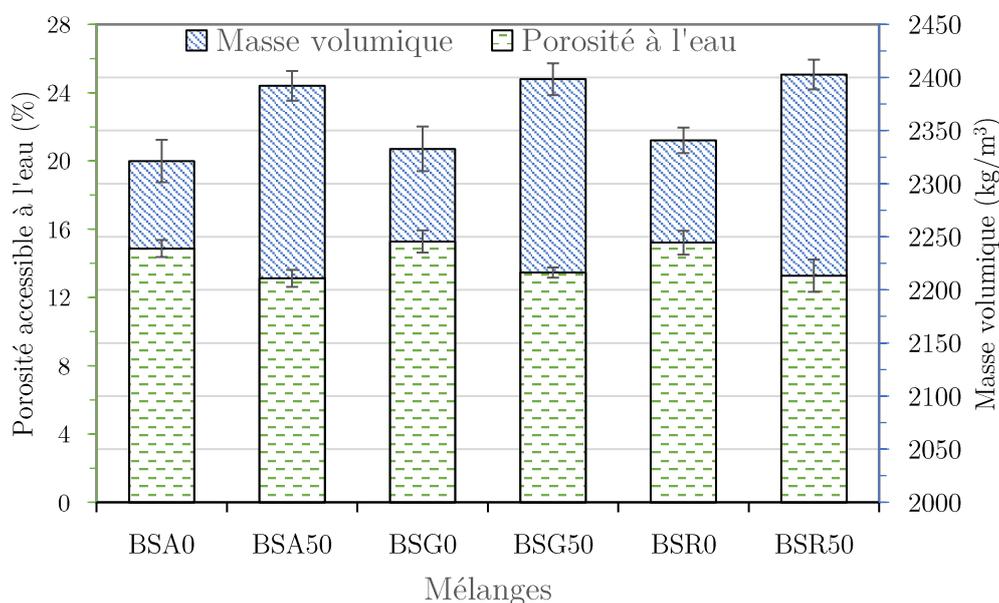


Figure IV. 14 : Evolution de la masse volumique et de la porosité accessible à l'eau des différentes formulations

L'étude montre pour tous les bétons composés uniquement avec du sable de rivière, une valeur de porosité similaire (environ 15,2%). Aucune influence significative de la provenance des granulats et sables n'est à remarquer sur la porosité. Une cohérence est notée aussi en ce qui concerne les mesures de masse volumique des trois bétons. Avec la substitution de 50 % de sable de carrière, on observe une baisse de la porosité. Cette baisse est respectivement de 11,78 %, 11,91 %, 12,68 %, par rapport à celle des bétons BSA0, BSG0 et BSR0. Cette baisse de porosité n'est pas significative par rapport aux écarts types obtenus. Cette faible différence de porosité peut être liée à la teneur en particules fines plus importante du sable de carrière. En effet, la présence des fines apportées par les sables de concassage permet un meilleur arrangement de la structure granulaire et donc de la distribution de la taille des pores accessibles à l'eau [dos Santos, 2003].

L'analyse comparée de la masse volumique des bétons indique que le mélange avec 50 % de sable de carrière n'a pas eu d'influence significative sur la densité du béton. Les variations relatives entre les masses volumiques des bétons BSA50 et BSA0, BSG50 et BGA0, BSR50 et BSR0 sont respectivement de 2,96 %, 2,78 % et 2,58 %. Cela est dû à la masse volumique plus élevée du sable concassé par rapport à celle du sable de rivière. Les différences observées entre la masse volumique théorique et la masse volumique réelle, obtenues par pesée hydrostatique peuvent être attribuées à la masse d'air. Ces différences sont en moyenne de 48 % et 26 % pour les bétons sans sable concassé et ceux à 50 % de sable concassé, respectivement.

L'étude a permis d'observer que les bétons ayant la plus grande valeur de masse volumique ont une plus faible valeur de porosité accessible à l'eau. Ainsi, la masse volumique et la porosité évoluent dans le sens inverse. Ces résultats sont conformes aux études de la littérature [A. Vichot et al., 2008; Ghrieb et al., 2014].

IV.4.2.3 Caractéristiques thermiques

Les propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité thermique et diffusivité thermique) sont déterminées sur les bétons contenant uniquement du sable de rivière et ceux qui en contiennent 50 %. Les résultats sont reportés dans le tableau IV.9. La figure IV. 15 présente les valeurs de la conductivité thermique et la masse volumique des échantillons de béton.

Tableau IV. 9 : Caractéristiques thermiques des bétons

Mélanges	Conductivité thermique (W/m.°K)		Capacité Thermique (kJ/kg.°K)		Diffusivité thermique (mm ² /s)
	Valeur moyenne	Ecart type	Valeur moyenne	Ecart type	Valeur moyenne
	BSA0	2,04	0,1	1,65	0,12
BSA50	2,11	0,04	1,83	0,09	1,15
BSG0	2,05	0,13	1,77	0,16	1,16
BSG50	2,19	0,12	1,87	0,19	1,17
BSR0	2,10	0,13	1,40	0,11	1,50
BSR50	2,27	0,15	2,02	0,26	1,12

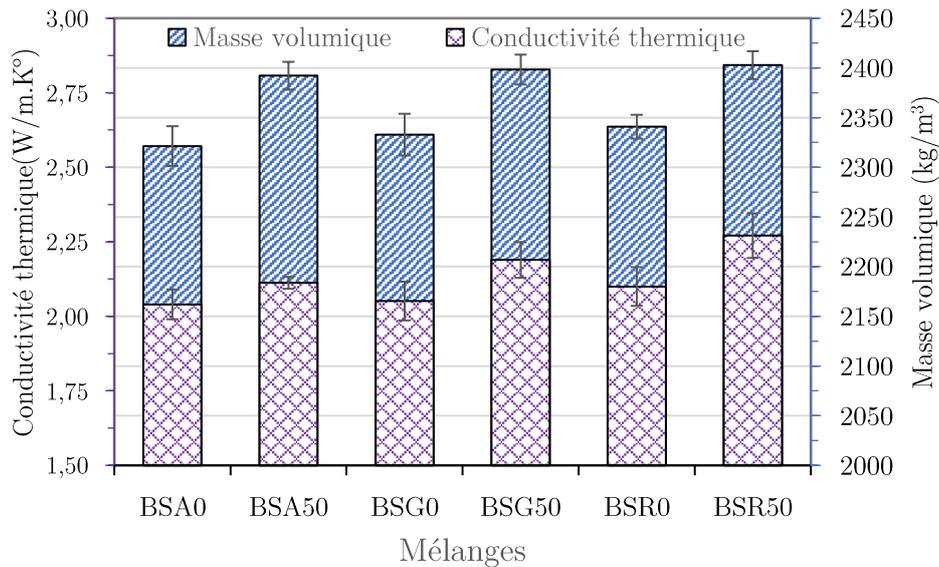


Figure IV. 15 : Valeurs de la conductivité thermiques des bétons

Les valeurs de conductivité thermique varient entre 2,04 W/m.°K (BSA0) et 2,27 W/m.°K (BSR50). Ces résultats témoignent de manière générale de la qualité moyenne de la faculté isolante des bétons. Pour les bétons composés d'un mélange de sable de concassage et de rivière à 50 %, la capacité thermique moyenne est de 1,9 kJ/kg. °K. Celle des bétons de sable de rivière est en moyenne de 1,61 kJ/kg. °K. Les bétons composés de 50 % de sable de concassage semblent avoir une capacité thermique légèrement plus élevée que les bétons composés uniquement de sable de rivière. Les résultats indiquent également que l'utilisation de sable de concassage à 50 % de mélange influence très peu la diffusivité thermique du béton.

En outre, on remarque une cohérence entre les valeurs de conductivité thermique et la masse volumique du béton, ce qui met en évidence l'importance de l'air pour la réduction de la conductivité thermique (les bétons ayant la plus grande valeur de conductivité thermique ont une masse volumique plus grande). Cela concorde avec les résultats de Bikoko et al., [Bikoko et al., 2019] qui ont montré que l'augmentation de la conductivité thermique du béton est proportionnelle à l'augmentation de la masse volumique.

IV.4.2.4 Perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque au gaz

Le principe de détermination de la perméabilité intrinsèque à partir des courbes de perméabilité apparente mesurée sur différents bétons a été présenté au chapitre II §.5.2.7. La courbe de perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne est donnée par la droite d'ajustement des nuages de points obtenus (droite de Klinkenberg). L'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées permet de calculer la perméabilité intrinsèque K_{int} . Les points d'intersection ont permis d'avoir les résultats de perméabilité intrinsèque. Les valeurs de perméabilité intrinsèque sont consignées dans le tableau IV.10. La figure IV.16 met en relation la perméabilité intrinsèque et la porosité accessible à l'eau.

Tableau IV. 10 : Valeurs de perméabilité intrinsèque

Mélanges	BSA0	BSA50	BSG0	BSG50	BSR0	BSR50
Perméabilité intrinsèque : Kint ($\times 10^{-17} \text{ m}^2$)	8	6,5	9	8	9,7	8,5
Ecart type	0,5	0,4	0,4	0,3	0,6	0,5

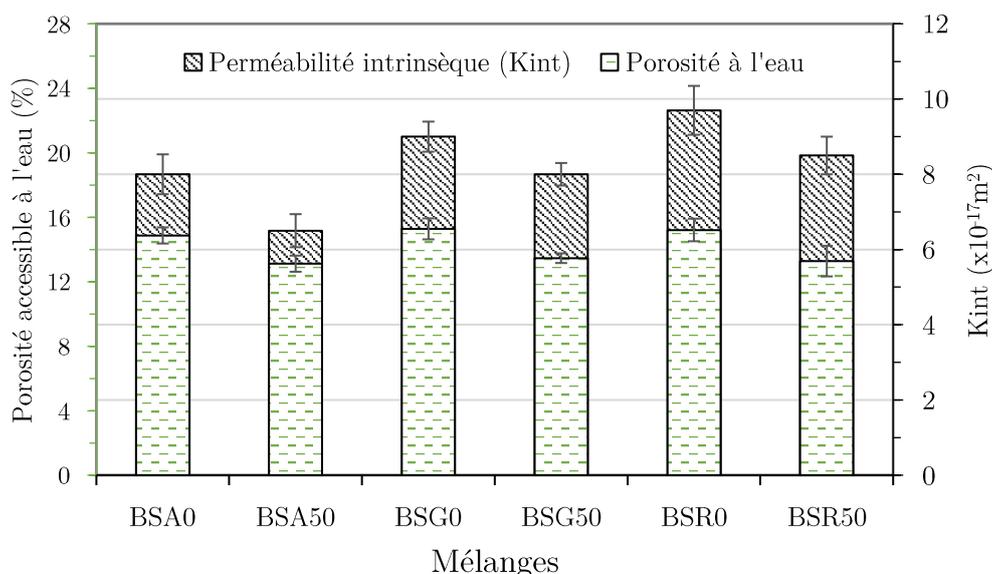


Figure IV. 16 : Perméabilité intrinsèque et porosité accessible à l'eau des bétons étudiés.

Les résultats montrent que les valeurs de porosité à l'eau sont similaires pour tous les bétons. Concernant la corrélation, il existe une très légère variation en fonction de la provenance du sable. La valeur la plus élevée est de $10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, ce qui correspond au béton BSR0. En outre, on observe des réductions considérables de la perméabilité intrinsèque des bétons BSA0, BSG0 et BSR0 respectivement par rapport aux bétons BSA50, BSG50 et BSR50. Les valeurs de ces réductions sont respectivement de 18,75 %, 11,11 % et 10,52 %. Ces résultats sont liés aux fines du sable concassé, qui contribuent à réduire la structure poreuse du béton. Cela est en accord avec les travaux de Berredjem et al. [Berredjem et al., 2020].

IV.4.2.5 Analyse des modes de rupture des bétons

Cette partie de l'étude présente les modes de rupture observés sur les éprouvettes après les essais de traction par fendage et de compression simple. On se propose ici de faire une étude comparative des faciès de rupture (sous essais de traction par fendage) et du mode de rupture (sous essais de compression) des bétons étudiés

IV.4.2.6.1 Etude des faciès de rupture sous l'effet de traction par fendage

Lors de l'essai de traction par fendage, il se produit une rupture progressive des zones tendues, avec des tensions à l'interface granulats/pâte de ciment, entraînant leur

séparation. L'évolution de ces ruptures se développe différemment dans les éprouvettes de bétons. Les images de la figure IV.27 (a et b) présentent les faciès de rupture développées lors de la perte d'adhérence pour le béton composé de 100 % de sable de carrière Razel (image a) et pour le béton composé de 100 % de sable de rivière à une échéance de 28 jours.

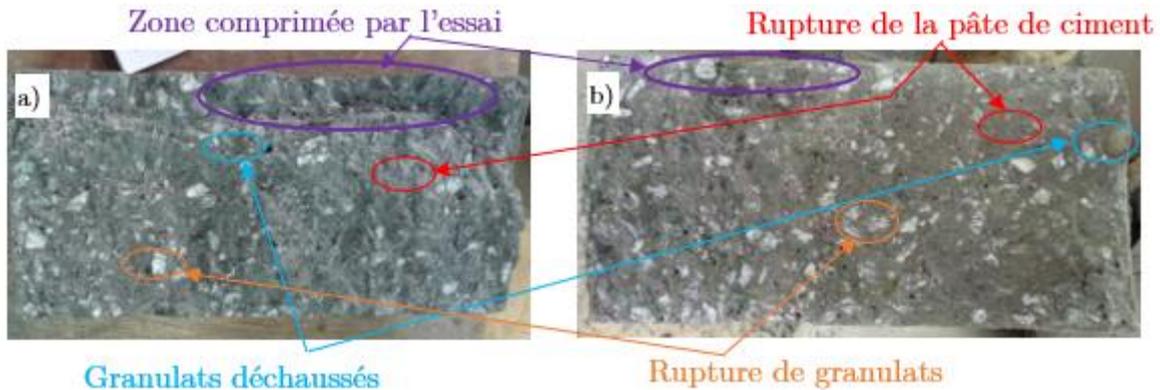


Figure IV. 17 : Faciès de rupture de béton de BSR100 (a) ; BSR0 (b)

Nous observons sur les faciès de rupture différents phénomènes :

- Une rupture de granulats sur les différents bétons (images a et b) ;
- Une rupture de la zone de contact pâte/granulat : elle est plus accentuée dans l'éprouvette de béton composé de sable de concassage (image a), par rapport à celle composée de sable de rivière ;
- La zone comprimée par l'essai ; l'impact est plus grand sur l'éprouvette de béton de sable de concassage (image a) par rapport à l'impact observé sur l'éprouvette de béton de sable de rivière (image b).

IV.4.2.6.2 Mode de rupture en compression du béton

Les images de la figure IV.18 illustrent les modes de rupture des différents bétons sous l'effet d'une charge de compression.

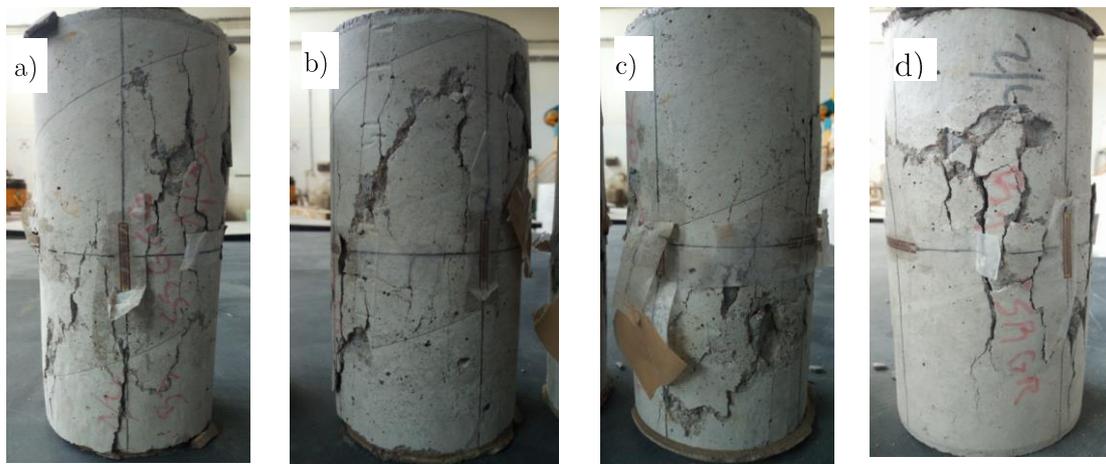


Figure IV. 18 : Présentation des modes de rupture des bétons BSG0 (a) ; BSG50 (b) ; BSR0 (c) ; et BSR50 (d).

L'analyse macroscopique visuelle des échantillons après l'essai montre que le mode de rupture en compression n'est pas excellent pour tous les bétons. Toutefois, celui des bétons composés de mélange des sables à hauteur de 50 % (images a et b) se développe sous forme de bandes de cisaillement qui sont inclinées à environ 45° par rapport à la direction de contrainte axiale, comparativement à celui des bétons composés de 100 % de sable de rivière, caractérisé par l'éclatement de la matrice du béton (images c et d). Ce résultat peut être expliqué par la cohésion plus importante dans la structure des bétons composés d'un mélange des deux sables, comparativement à ceux composés uniquement de sable de rivière.

IV.5 RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS

Cette section est consacrée à la détermination des propriétés des mortiers de bétons formulés. Plus précisément, il sera question de présenter la résistance à la compression et à la flexion, la porosité accessible à l'eau, la masse volumique, l'évolution du retrait de séchage et la perte de masse. La corrélation entre le retrait de séchage et la perte de masse via le calcul du coefficient de contraction hydrique est également détaillée.

IV.5.1 Porosité et masse volumique des mortiers

Le tableau IV.12 présente les valeurs de la porosité accessible à l'eau, et celles de la masse volumique des mortiers. La figure IV.19 montre la variation de la porosité accessible à l'eau en fonction de la composition des mortiers.

Tableau IV. 11: Valeurs de porosité accessible à l'eau obtenues sur les échantillons de mortier

Mélanges	MSA100	MSG100	MSR100	MSS100	MSA50	MSG50	MSR50
Porosité (%)	25,4	18,7	18,4	17,6	20,5	20,1	20,2
Ecart type (%)	1,4	0,8	0,9	0,86	0,9	0,67	0,77
Masse volumique (kg/m ³)	2342,4	2394,9	2362,7	2117,1	2221,9	2248,4	2227,2
Ecart type (kg/m ³)	13,8	11,7	15,6	13,8	10,3	14,8	13,3

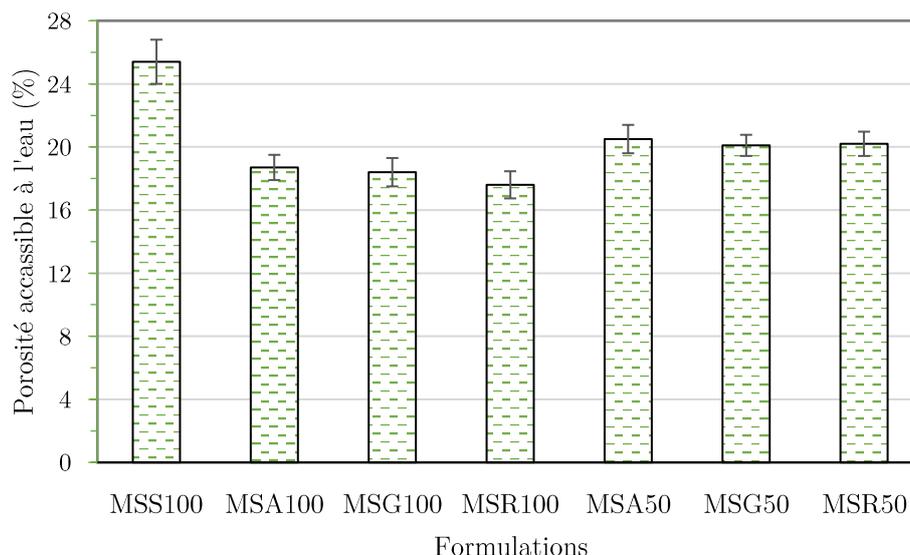


Figure IV. 19: Evolution de la porosité en fonction des compositions de mortier

Les résultats de porosité montrent que le mortier de sable de rivière MSS100 a une valeur de porosité élevée ($P = 25,4 \%$) par rapport aux mortiers de sable concassé MSA100, MSG100 et MSR100, dont les valeurs de porosité sont pratiquement semblables ($P = 18 \%$ en moyenne). Cette différence est attribuée à la faible teneur en particules fines du sable de rivière (1,4 % du sable de rivière, contre 6,5-8,5 % pour les sables de concassage). Les mortiers composés de 50 % de mélange des deux types de sable MSA50 MSG50 et MSR50 présentent une porosité en moyenne égale à 20,2 %. Nous rappelons ici que les porosités mesurées sur les bétons étaient plus faibles et présentaient des valeurs similaires quelle que soit la formulation utilisée. Les valeurs sont en moyenne de 15,2 % pour les bétons de 100 % de sable de rivière, contre 25,4 % pour les mortiers de ce sable, et de 13,2 % pour les bétons de 50 % de mélange, contre 20,2 % pour les mortiers faits de 50 % de mélange des deux types de sable. Globalement, la porosité accessible à l'eau est plus grande pour les mortiers que pour les bétons. Ainsi, l'utilisation de sable concassé dans le mortier permet de diminuer la porosité accessible à l'eau.

L'étude montre également que les masses volumiques des mortiers de sables de concassage sont comparables, avec une valeur moyenne de 2367 kg/m^3 . La masse volumique est un peu plus faible pour les mortiers avec 50 % de sable concassé (en moyenne 2232 kg/m^3), et encore plus faible pour le mortier à 100 % de sable de rivière (2117 kg/m^3). La masse volumique étant liée à la densité des sables, la faible valeur obtenue pour le mortier de sable de rivière se justifie. Plus cette masse volumique est faible, plus le matériau est poreux.

IV.5.2 Résistance à la compression et à la flexion trois points

Le tableau IV.13 présente les valeurs de la résistance à la compression et à la flexion obtenues sur éprouvettes de mortiers 40 x40x 160 mm après 28 jours de cure à l'eau. La

figure IV.20 présente la corrélation entre les résistances à la compression et à la flexion des mortiers.

Tableau IV. 12: Valeurs de la résistance à la compression et à la flexion trois points

Mélanges	MSS 100	MSA 100	MSR 100	MSG 100	MSA 50	MSR 50	MSG 50
Compression (MPa)	3,6	5,9	5,7	5,6	4,7	4,3	4,0
Ecart type (MPa)	0,4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3
Flexion (MPa)	17,8	30,3	29,0	28,3	23,5	21,8	20,4
Ecart type (MPa)	1,3	1,7	1,1	1,4	0,7	0,9	1,0

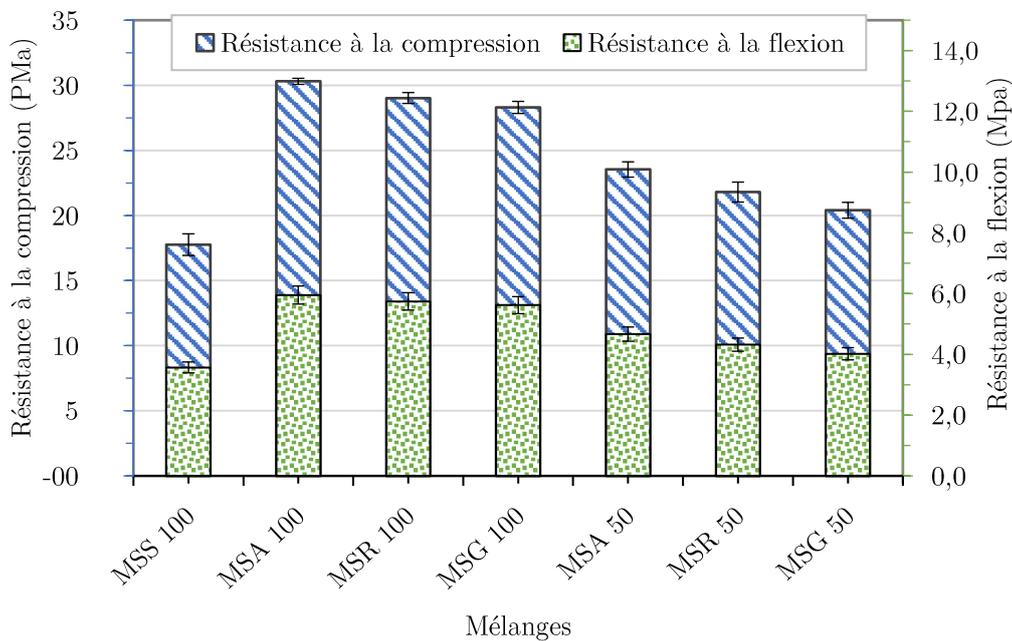


Figure IV. 20 : Corrélation entre résistance à la compression et résistance à la flexion

Les résistances des mortiers confectionnés uniquement avec du sable de concassage sont similaires. Le mortier composé uniquement de sable de rivière a une faible résistance à la compression (18 MPa) par rapport aux mortiers composés de 100 % de sable concassé (20-30 MPa). Les valeurs moyennes de résistance à la compression sont d'environ 22 MPa pour les mortiers à 50 % de mélange. Le gain de résistance à la compression est de 14 MPa, 10 MPa et 12 MPa, respectivement entre MSA50, MSG50, MSR50 et MSS100. Cette différence moyenne était d'environ 7 MPa entre les mortiers à 100 % de sable concassé et les mortiers à 50 % de mélange pour la flexion. La substitution du sable de rivière par du sable de concassage à minima de 50 % permet d'augmenter la résistance à la compression et la résistance à la flexion. En effet, une teneur optimale en fines est nécessaire pour la cohésion à l'interface entre la matrice de ciment et le sable [Menadi et al., 2009]. Toutefois, et contrairement aux résultats obtenus sur les bétons, on observe

que les caractéristiques mécaniques des mortiers faits de 100 % de sable de rivière semblent être plus faibles que celles obtenus avec 50 % de mélange. Cela est cohérent avec les résultats de porosité obtenus sur les mortiers et bétons.

IV.5.3 Pertes de masse et retrait de séchage

L'analyse comparative du comportement hydrique des mortiers est réalisée via des mesures de retrait de séchage et de perte de masse sur des éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions 40 x 40 x 160 mm, suivant le protocole décrit au chapitre II. La figure IV. 21 présente l'évolution des pertes de masse des différents mortiers, tandis que la figure IV.22 présente celle du retrait de séchage sur une période de 28 jours.

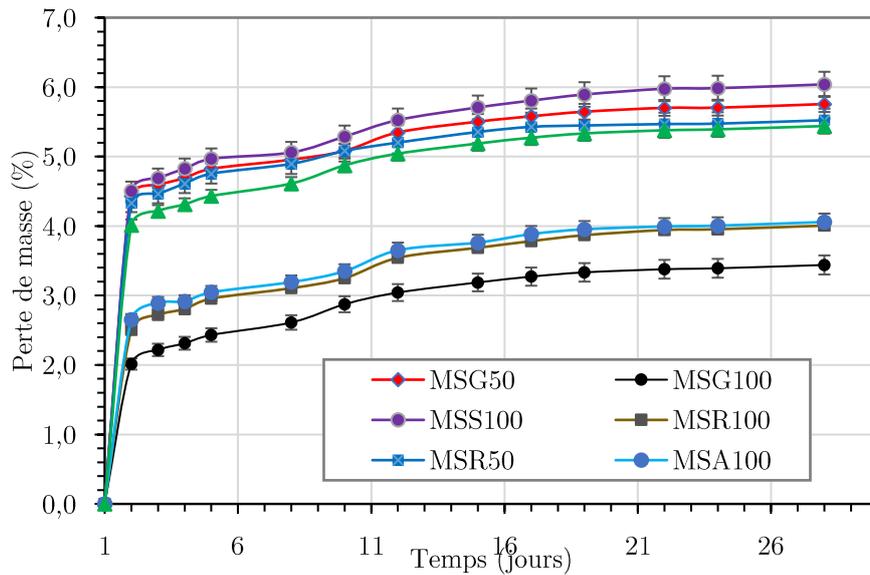


Figure IV. 21. Evolution de la perte de masse des différents mortiers

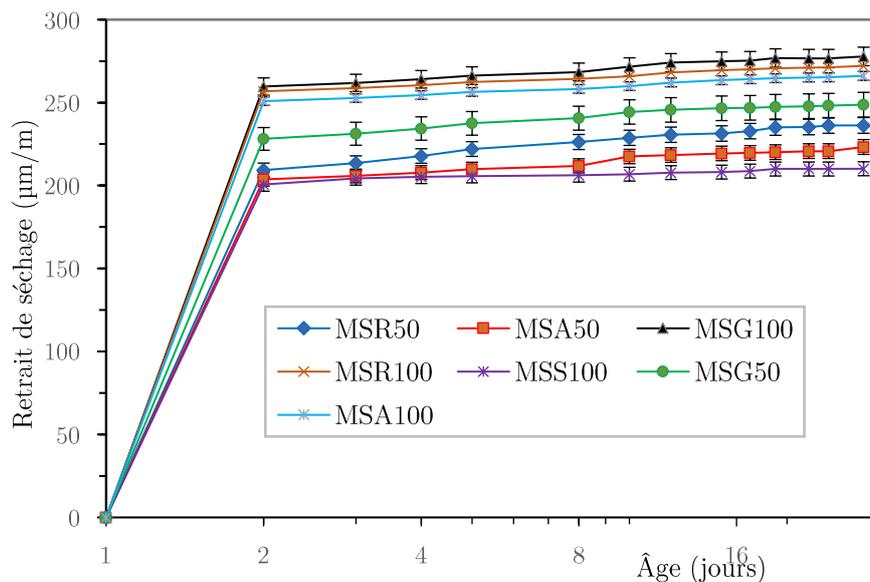


Figure IV. 22 : Retrait de séchage des différents mortiers

De manière générale, nous observons une similitude sur la cinétique de perte de masse de toutes les formulations. L'examen des courbes de perte de masse permet d'identifier trois phases de variation. La première phase s'étend sur environ 48 heures après le démoulage. Elle est très rapide et représente plus de 60 % de la perte de masse totale sur la période de séchage. Cette phase correspond à la perte de l'eau libre contenue dans les matériaux. La deuxième phase commence après le deuxième jour jusqu'au 16^{ème} jour. Elle est moins rapide, avec une allure plus ou moins linéaire. La troisième phase s'étend du 18^{ème} jour jusqu'à la fin de la mesure. Pendant cette phase, la perte de masse varie très faiblement, indiquant que l'équilibre hydrique commence à être atteint. La perte de masse varie entre 3,44 % (MSG100) et 6,08 % (MSS100) sur la période de 28 jours.

Sur la période des 28 jours de mesure, le mortier composé uniquement de sable de rivière (MSS100) a une perte de masse plus élevée que les autres mortiers. Ceci s'explique par la perméabilité plus élevée et la libération rapide de l'eau, du fait de son réseau poreux. En effet, plus cette masse volumique est faible, plus le matériau devrait être poreux et l'évaporation d'eau favorisée [Bouhamou et al., 2009], [Amba, 2008], [Kenai and Debieb, 2011].

En outre, les courbes de retrait montrent que le retrait de séchage est très élevé pour toutes les compositions dès les premiers jours. Ce qui concorde avec la perte de masse élevée sur cette phase. La combinaison de ces facteurs conduit à la diminution du retrait de séchage [Neville, 1995]. Les mortiers composés de 50 % de sable de concassage présentent un retrait de séchage relativement faible par rapport à ceux à 100 % de sable de rivière.

IV.5.4 Détermination du coefficient de contraction hydrique

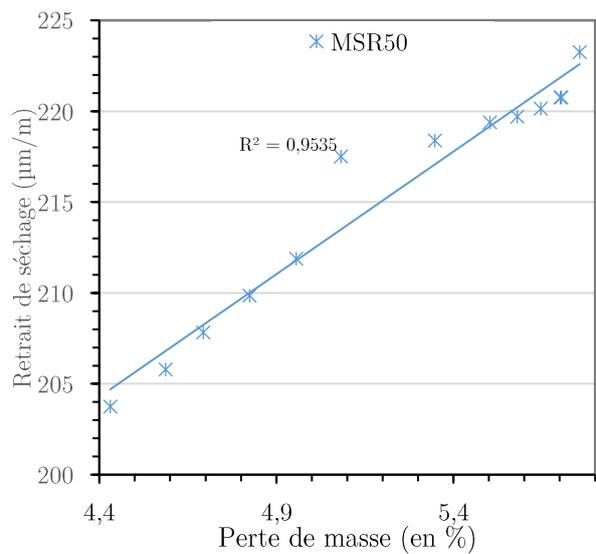
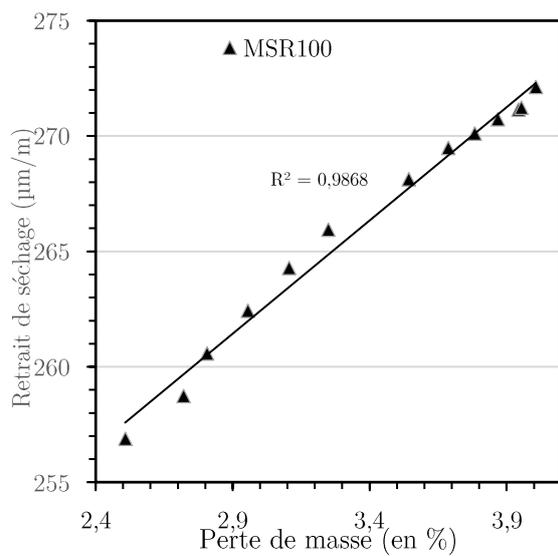
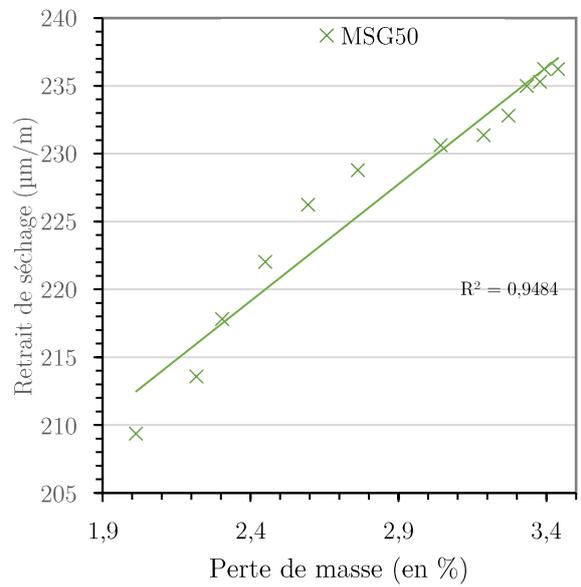
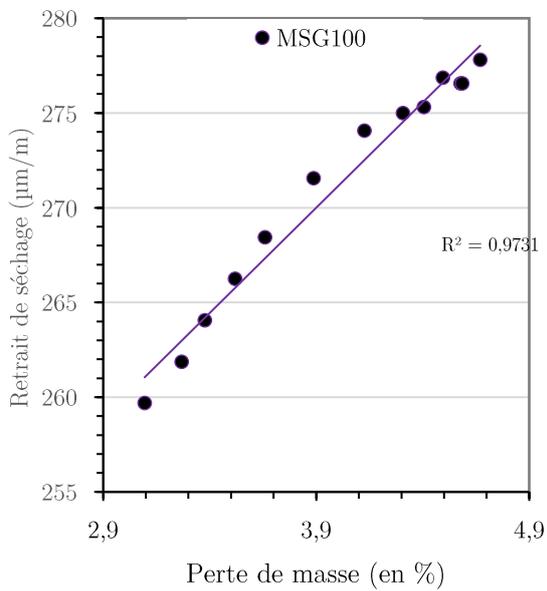
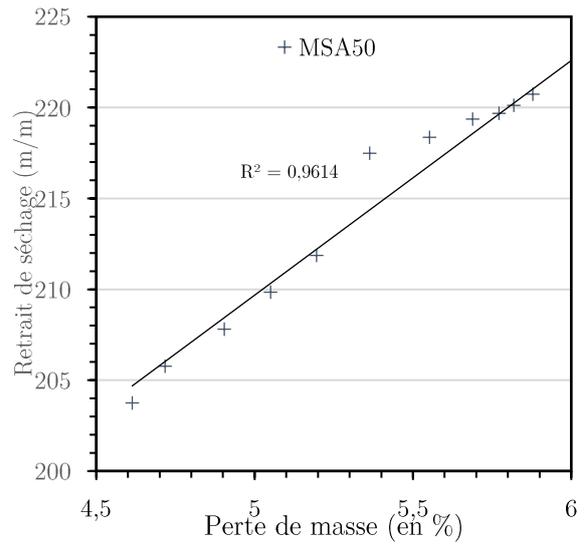
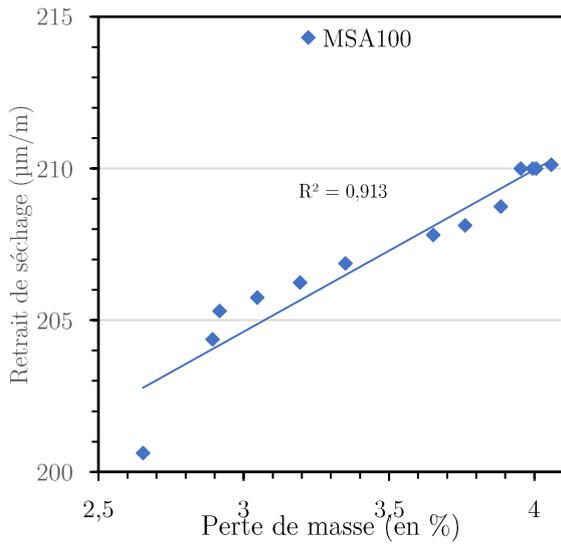
L'objectif de cette section est d'établir les corrélations entre les variations dimensionnelles dues au retrait de séchage et la perte de masse des échantillons de mortier. Les courbes de la figure IV 23 présentent les variations du retrait de séchage en fonction de la perte de masse des différents mortiers formulés. A partir des pentes des droites de régression obtenues, le coefficient de contraction hydrique p est déterminé. Ce coefficient est donné par la formule ci-dessous [Granger 1997a] :

$$p = \frac{a}{\rho_{mortier}}$$

Avec :

- a la pente de la droite de régression,
- $\rho_{mortier}$ la masse volumique apparente de chaque mortier.

Le tableau IV.13 présente les valeurs du coefficient de contraction des différents mortiers.



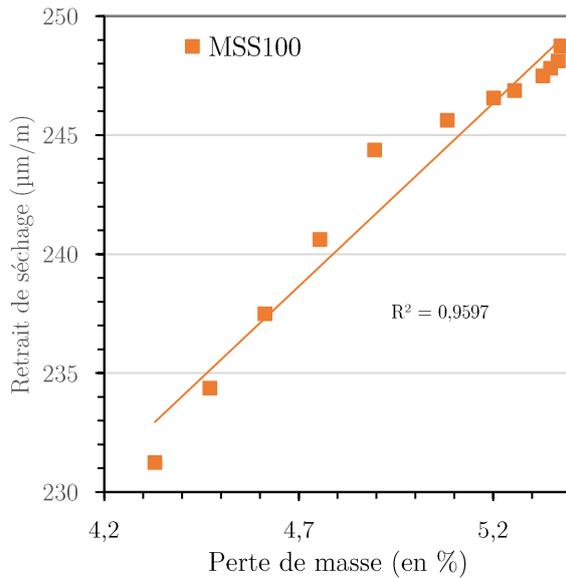


Figure IV. 23 : Variations du retrait de séchage en fonction de la perte de masse des différents mortiers

Tableau IV. 13 : Valeurs du coefficient de contraction hydrique des différents mortiers

Mélanges	MSA100	MSG100	MSR100	MSS0	MSA50	MSG50	MSR50
Coefficient de contraction hydrique (10^{-6})	2,3	4,6	4,2	8,3	5,7	7,7	6,1

Pour toutes les formulations, on observe une corrélation forte (avec des coefficients de corrélations tous supérieurs à 0,91) entre le retrait de séchage et la perte de masse.

IV.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons et mortiers formulés. Les principaux résultats retenus sont les suivants :

- L'augmentation de la proportion de sable de concassage diminue l'affaissement du béton. Cela est dû à la proportion élevée de particules fines dans les sables de concassage. Cette forte proportion de particules fines dans les sables de carrière a également un impact sur le retrait de séchage du béton, ainsi que sur la porosité accessible à l'eau et sur la perméabilité au gaz ;
- Les bétons avec des substitutions du sable de rivière par du sable de concassage avec un minima de 50 % jusqu'à 90 % présentent des résistances mécaniques proches des bétons composés uniquement de sable de rivière, quelle que soit l'origine du sable de concassage ;
- Les mortiers de mêmes proportions de sable de concassage présentent des caractéristiques mécaniques presque similaires ;

Ainsi, d'un point de vue des caractéristiques mécaniques et physiques, l'utilisation du sable de concassage provenant des carrières Arab Contractor, Gracam et Razel à

Yaoundé peut être recommandée pour une utilisation dans la fabrication de mortiers et bétons. Dans le prochain chapitre, nous ferons une analyse de la microstructure et des propriétés de durabilité, ce qui permettra de compléter les caractéristiques de bétons et mortiers à base de sable de concassage.

Chapitre V. PROPRIETES RELATIVES A LA DURABILITE ET ANALYSE MICROSTRUCTURALE

V.1. INTRODUCTION

Les ouvrages de génie civil sont généralement exposés à des environnements agressifs, notamment les attaques aux acides, aux sulfates, ainsi que l'exposition aux dioxydes de carbone contenu dans l'air, avec des conséquences considérables sur leur durée de vie. L'intensité des désordres observés sur ces ouvrages dépend généralement des matériaux utilisés. La caractérisation des granulats a permis d'observer des différences dans les proportions des composés chimiques, ainsi que les phases minérales présentes dans les sables concassés par rapport au sable de rivière. L'objectif de ce chapitre est de faire une analyse des indicateurs spécifiques de durabilité (carbonatation accélérée, attaque chimique à l'acide chlorhydrique et au sulfate de sodium) sur les mortiers et bétons à base de sable de concassage et de sable de rivière, composé de ciment CEM II 42.5R. Cette analyse sera complétée par une caractérisation microstructurale à l'aide d'examen DRX, ATG et MEB. Pour toutes les formulations, une étude de l'influence de l'attaque chimique sera faite sur la résistance à la compression et à la flexion sur éprouvettes de mortier. Il s'en suivra une étude de dégradation et de perte de masse.

V.2 CARACTERISATION MINERALOGIQUE

V.2.1 Modification de la composition minéralogique par analyse DRX

Les diagrammes de diffraction des rayons X, noté DRX, du sable SS et des mortiers MSR50 et MSS100 sont présentés sur la figure V.1, tandis que ceux du sable SR, ainsi que des mortiers MSR50 et MSR100 sont présentés sur la figure V.2. L'objectif est ici de comparer les pics obtenus pour identifier le rôle de l'ajout du sable concassé.

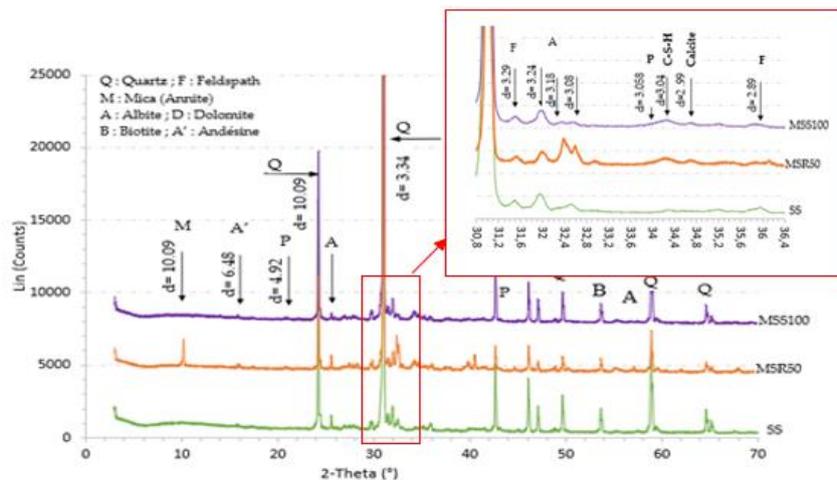


Figure V. 1: Diagrammes de DRX de sable SS et de mortiers de sable mélangé MSR0 et MSR50

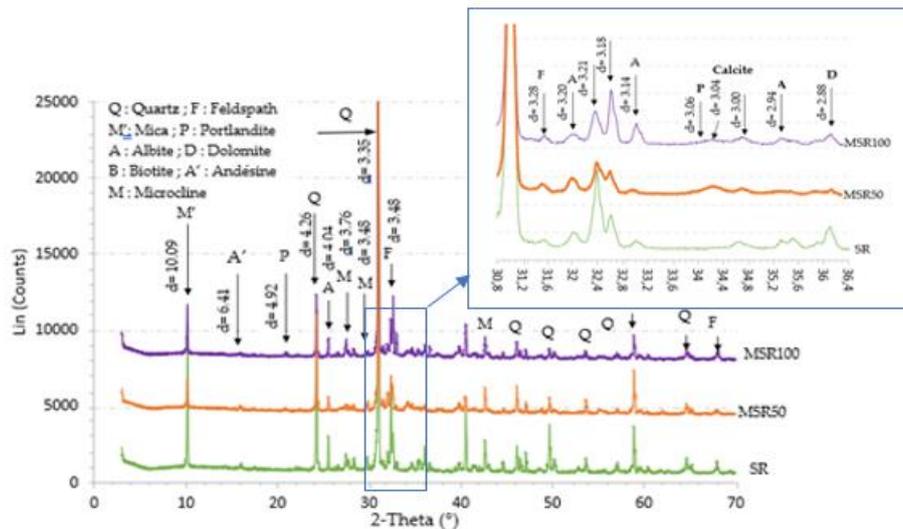


Figure V. 2 : Diagramme de DRX des mortiers de sable SR et de sable mélangé MSR100 et MSR50

L'analyse des différents spectres montre qu'après l'ajout de ciment, quelques changements sont produits dans les différents mortiers.

Des changements de hauteur sont clairement observés. On note l'apparition d'un pic à 10° 2θ (figure V.1) sur le spectre du mortier MSR50, ce qui n'est pas le cas sur les spectres du sable SS et du mortier MSS100, confirmant ainsi la présence d'une quantité importante de micas provenant du sable de carrière SR dans le mortier de mélange de deux sables. Ce pic est effectivement observé plus fortement sur le modèle DRX du sable SR, ainsi que sur les spectres de MSR50 et MSR100 (figure V.2).

Aussi, et de manière générale, on observe un changement de hauteurs de pics dans les spectres de mortiers par rapports à ceux des sables. Ces variations de hauteurs de pics peuvent être dus à une variation des quantités de phase, du fait du mélange de sables, de la dilution du ciment ou de la dissolution de la phase en milieu alcalin, ainsi qu'à une variation de l'agrégation des particules. En effet, l'orientation préférentielle des phases pendant le remplissage du porte-échantillon de DRX utilisé est réduite en présence de la pâte de ciment, ce qui affecte principalement les phases en forme de feuille (un Mica feuilleté noté M') devenant parallèles au plan de compactage de l'échantillon dans le porte-échantillon de DRX [Guenanou et al., 2019]. En présence de ciment qui permet la dispersion des feuilles, puis leur immobilisation après durcissement, l'orientation préférentielle diminue, induisant par exemple une diminution du pic de l'annite ($(K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Si_3AlO_{10}))$) à $d = 10,09\text{\AA}$ alors que sa quantité peut rester constante. Un petit pic associé à la portlandite ($d=4,92\text{\AA}$) a été observé comme on pouvait s'y attendre en présence de ciment Portland. La détection des hydrates cristallins ou amorphes C-S-H est restée difficile comme le montre la vue à grande échelle des figures 18 et 19. Le zoom représente la plage spécifique de 2 thêtas pour les principaux pics de DRX des hydrates de ciment et de la calcite/dolomite. Dans le cas du sable SR, la trace de calcite ($d = 3,00/2,99\text{\AA}$) semble provenir du sable lui-même (mais sa présence n'est pas conforme à la géologie). La carbonatation du ciment pendant le durcissement s'est

produite légèrement avec le développement d'un second pic associé à une nouvelle forme de calcite ($d = 3,04\text{\AA}$), également présente sur le mortier de sable de rivière. La formation de la calcite provient de la carbonatation de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cette phase est soluble dans l'eau des pores et libère des ions Ca^{2+} et OH^- . En présence de CO_2 de l'air, la calcite peut précipiter. La calcite peut également être obtenue par la carbonatation d'hydrates de ciment qui restent généralement à l'état amorphe dans une pâte cimentaire durcie.

V.2.2 Analyse thermogravimétrique et analyse thermique différentielle (ATG/ATD) des mortiers

L'analyse thermogravimétrique (ATG) réalisée sur les mortiers MSS100 et MSR100 a pour objectif d'approfondir la qualification et la quantification des phases hydratées au travers de leur décomposition avec l'élévation de la température. On pense en particulier à la Portlandite qui est un des principaux produits carbonatables et aux silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui confèrent au matériau ses performances mécaniques à l'état durci.

Les figures V.3 et 4 montrent les courbes d'analyse thermogravimétrique (ATG) et l'analyse thermique différentielle (ATD) pour les mortiers MSS100 et MSR100 après 90 jours de durcissement.

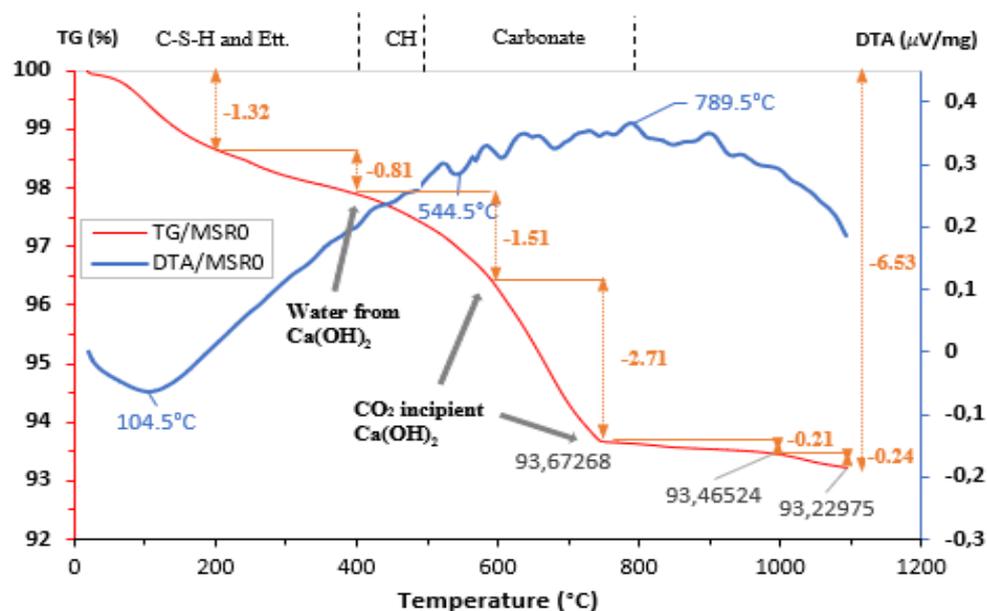


Figure V. 3 : Courbes ATG et ATD du mortier MSS100

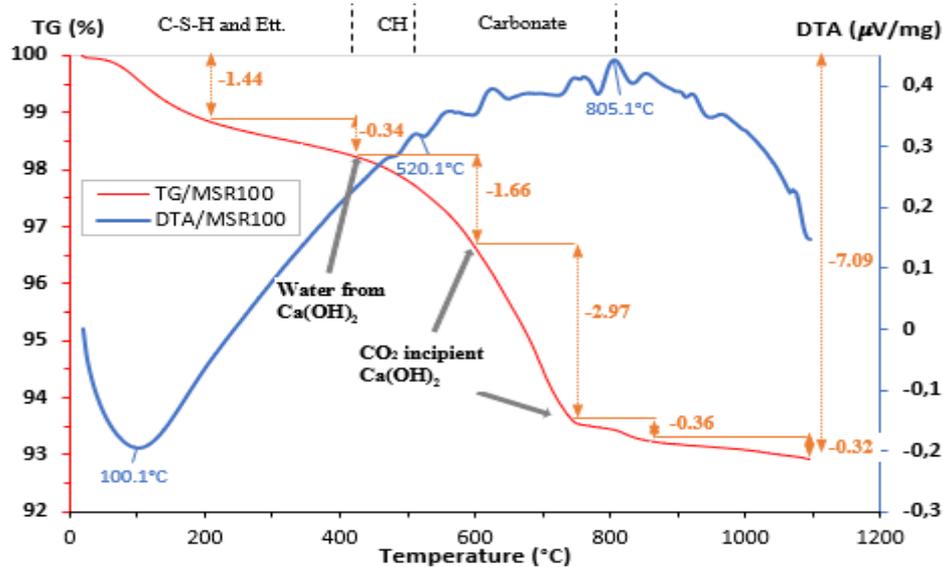
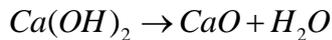
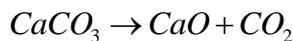


Figure V. 4 : Courbes ATG et ATD du mortier MSR100

La perte de masse associée à chaque point d'inflexion peut être utilisée pour déterminer la teneur en portlandite, C-S-H et calcite. Pour toutes les analyses, la première perte de masse entre 20 et 400°C résulte principalement de la perte d'eau libre et de la déshydratation du C-S-H et de la décomposition de l'ettringite. La deuxième perte de masse entre 400 et 600°C est due à la décomposition de la portlandite (CH) selon la réaction suivante :



Cette perte de masse correspond à un départ d'eau chimiquement liée. En effet, l'eau chimiquement liée commence à s'échapper du béton. Le troisième point d'inflexion, entre 600 et 800°C, est la conséquence de la décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO_3) produit par la carbonatation et d'autres composés carbonatés [Villain et al., 2007]. La réaction se produit suivant l'équation :



Cette réaction est exothermique et libère du dioxyde de carbone. L'analyse montre que les pertes totales de masse ou la perte à l'allumage du MSS100 (PAF = 6,53%) et du MSR100 (PAF = 7,09%) étaient similaires. La perte de masse entre 20 et 400 °C (départ de l'eau libre, décomposition de l'ettringite et du CSH), entre 410 et 480 °C (déshydroxylation du CH) et entre 580 et 750 °C (décarbonatation) représentait 1,32 %, 0,81 % et 2,71 % (figure V.19) pour le mortier MSS100 et 1,44 %, 0,34 % et 2,97 % (figure V.20) pour le mortier MSR100. La carbonatation du mortier de sable de rivière est légèrement plus élevée que celle du mortier de sable concassé. Elle pourrait être liée à la porosité plus élevée du mortier de sable de rivière. Les autres phases (CSH, ettringite ou portlandite) semblent être similaires quelle que soit la nature du sable et aucun effet négatif ne semble apparaître.

V.3 PROPRIETES DE DURABILITE SPECIFIQUE

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement [Baroghel-Bouny, 2007]. Certains indicateurs spécifiques permettent de la caractériser. Cette section est consacrée à l'analyse de la réaction des éprouvettes de mortiers aux attaques chimiques (acide chloridrique et sulfate de sodium) à un environnement d'agressivité chimique modérée (XA2) selon la norme NF EN 206-1, ainsi que la carbonatation. Comme indiqué à la fin du chapitre précédent, seules les formulations correspondantes à des proportions de 100 %, 50 % et 0 % de sable de concassage sont analysées dans cette partie.

V.3.1 Capillarité des mortiers

Le but de cet essai est de faire une analyse comparative de la quantité d'eau absorbée par remontée capillaire des mortiers composés avec les sables de concassage combinés au sable de rivière. L'essai a été réalisé sur des tranches d'éprouvettes de mortier de 70 x 40 x 40 mm. Afin d'éviter ou limiter tout échange et le séchage sur les faces latérales des échantillons, ces faces ont été recouvertes par un film autocollant imperméable. La masse d'eau absorbée a été déterminée par différence de pesées entre la masse initiale et la masse aux échéances de mesure suivant le protocole indiqué au chapitre II. La figure V.5 présente l'évolution du coefficient d'absorption capillaire des différents mortiers en fonction du nombre de jours (en racine carré). Le tableau V.1 présente les valeurs du coefficient d'absorption capillaires des différents mortiers à la fin de la période de 6 jours de mesures. La variation relative du coefficient de capillarité des mortiers (comparativement au mortier composé exclusivement de sable concassé) est illustrée par les histogrammes de la figure V.6.

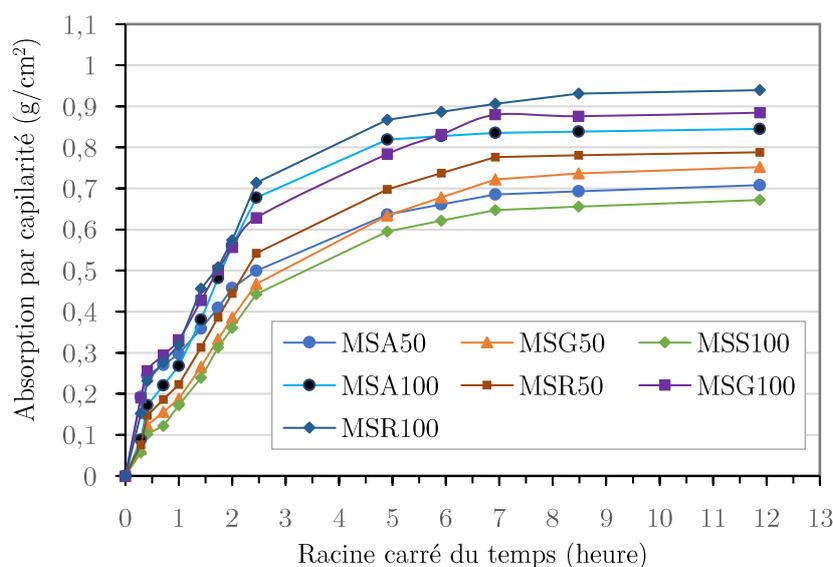


Figure V. 5: Evolution du coefficient d'absorption capillaire des mortiers en fonction du temps.

Tableau V. 1 : Valeurs du coefficient d'absorption par capillarité des mortiers

Mortiers	MSS 100	MSA 50	MSA 100	MSG 50	MSG 100	MSR 50	MSR 100
Coefficient d'absorption	0,7	0,7	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8
Ecart type	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0

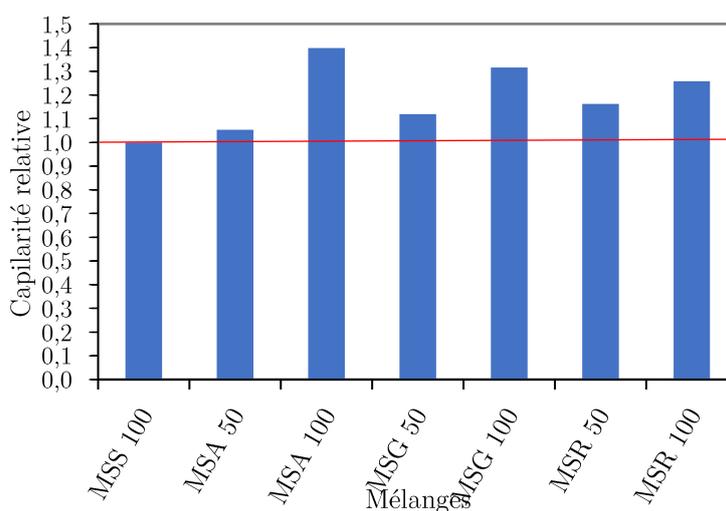


Figure V. 6 : Valeurs du coefficient de capillarité relative à celle du mortier MSS100

L'analyse des résultats de l'évolution du coefficient d'absorption par capillarité (figure V.6) permet d'identifier trois phases d'évolution du coefficient de tous les matériaux étudiés.

La première phase est presque linéaire et s'étend sur les 6 premières heures et est caractérisée par une absorption rapide pour toutes les compositions de mortier. Cette phase correspond au remplissage des capillarités les plus larges dans lesquelles l'eau pénètre en premier [Rabehi et al., 2013].

La deuxième phase qui s'étend de la 6^{ème} heure à la 56^{ème} heure (soit après deux jours) présente une courbure à tendance logarithmique. Cette phase est marquée par une absorption qui varie entre 0,8 g/m² (MSR100) et 0,5 g/m² (MSS100).

Quant à la troisième phase un fort ralentissement d'absorption est observé. Ce phénomène peut être attribué à une saturation du réseau poral. Le coefficient capillaire commence à évoluer faiblement pour tous les mortiers, avec des valeurs toujours plus élevées pour le mortier composé de sable de rivière par rapport à ceux composés de 50 % et 100 % de sable de concassage.

A l'issu des 149 heures (soit 6 jours) d'immersion, le mortier composé de 100 % de sable de rivière (bien que plus poreux, 24,5%) semble avoir un coefficient d'absorption légèrement moins élevé par rapport mortiers composés de 100 % de sable concassé des trois carrières (moins poreux, en moyenne 18,2), conformément aux données présentées dans le tableau V.1. Ces résultats sont expliqués par la faculté des éléments fins des

sables de concassage à absorber rapidement de l'eau, comparativement au sable de rivière qui est beaucoup plus grossier, (cf Chapitre III §§5.3.5 dans lequel on peut clairement voir que l'absorption des sables de concassage est plus élevée que celle du sable de rivière).

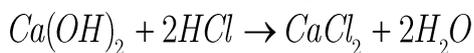
A travers le graphique de la figure V.2, on peut clairement voir que les mortiers composés de 50 % de sable de concassage semblent avoir une capillarité intermédiaire entre celle à 100% de sable concassé et celle à 100% de sable de rivière.

V.3.2 Réaction à l'acide chlorhydrique « HCl »

Les éprouvettes de mortier 40 x 40 x 160 mm ont été immergées et conservées dans une solution saturée d'acide chlorhydrique (0,5 % en volume) pendant 259 jours. Un suivi de l'évolution de la masse a été fait sur la durée de l'immersion (*la situation sanitaire liée au Covid 19 a obligé à avoir une période sans mesures entre 105 et 256 jours*). Des essais de résistance à la compression et à la flexion par traction sont réalisés sur les éprouvettes après la période d'immersion. Une série de 3 échantillons sont testés pour chaque formulation.

V.3.2.1 Variation de masse

L'attaque à l'acide chlorhydrique est provoquée par la réaction avec une partie d'hydroxyde de calcium de la pâte cimentaire, produisant un sous-produit de sel de calcium fortement soluble, affaiblissant la structure du matériau, ce qui se traduit par une perte de matière [Belaribi, 2015]. La réaction est produite suivant la formule :



L'effet de l'attaque à l'acide chlorhydrique est évalué par la perte de masse. Le calcul des variations relatives de masse (dont le détail est précisé au chapitre II) est obtenu à partir de la formule ci-dessous. Ce calcul est effectué à partir de la masse de l'échantillon avant son immersion dans la solution.

$$\Delta M = 100 \times \frac{M_0 - M_j}{M_0}$$

où

ΔM : la variation de masse, exprimée en % ;

M_0 : la masse de l'éprouvette avant l'immersion dans la solution ;

M_j : la masse de l'éprouvette le jour j de la mesure.

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau de robinet pour éliminer le béton altéré et sont laissées à sécher pendant 30 mn. Une pesée est ensuite réalisée. La balance utilisée est d'une précision de 0,01 g. Les figures V.7 (a, b et c) présentent respectivement les évolutions de masse des mortiers exposés à l'attaque d'acide chlorhydrique, confectionnés à 100 % et à 50 % de sable des carrières Arab Contractor, Gracam et Razel.

La figure V.8 récapitule le fuseau obtenu de toutes les variations de masse des mortiers avec les granulats des trois carrières et le sable de rivière.

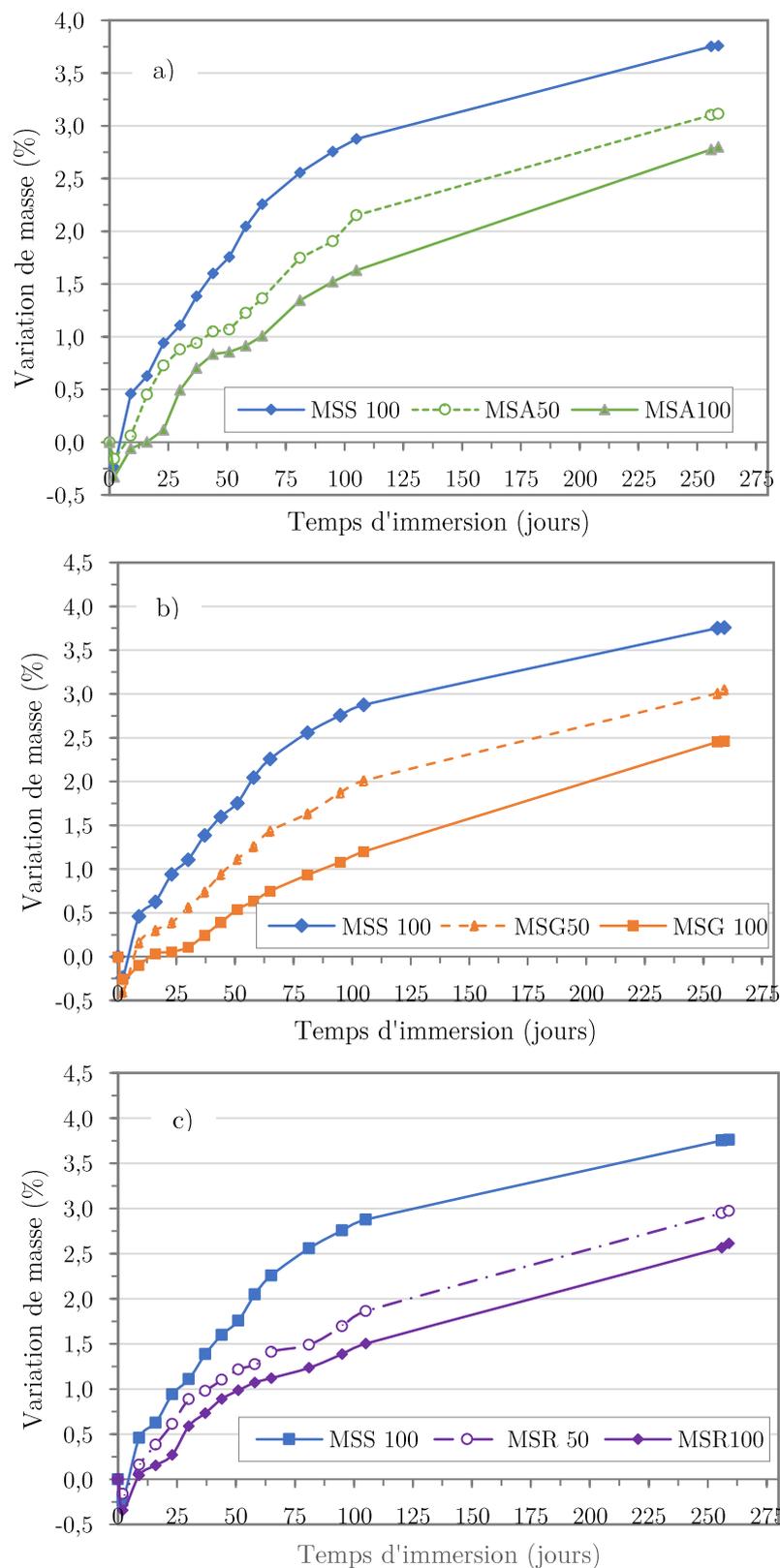


Figure V. 7: Variation de masse des mortiers MSS100, MSA50 et MSA100 (a) ; MSS100, MSG50 et MSG100 (b) ; MSS100, MSR50 et MSR100 (c) en solution de HCl

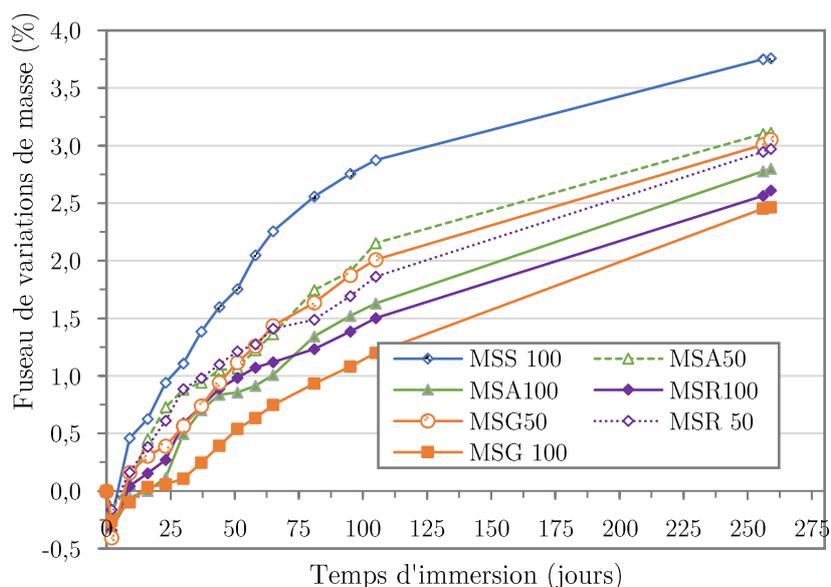


Figure V. 8 : Fuseau des variations de masse des différents mortiers conservés dans des solutions de HCl

L'analyse de l'évolution des courbes de perte de masse fait observer que pour toutes les formulations, il semble avoir un gain de masse de moins de 0,5% pendant les deux premiers jours de l'immersion. Ceci peut être expliqué par la saturation du réseau poreux des éprouvettes. En effet, le gain de masse est d'autant plus important que le mortier est poreux. Après cette période, on observe une perte progressive de la masse des éprouvettes de mortiers jusqu'à la fin de la mesure. Ainsi, le gain le plus élevé est obtenu pour le mortier de 100 % de sable de rivière, dont la porosité à l'eau est plus importante (environ 25,4%) par rapport aux autres mortiers (en moyenne 18,4% pour les mortiers à 100% de sable concassé et 20,2% pour les mortiers à 50% de mélange des deux types de sables). Au bout des 259 jours d'immersion, on observe également que le mortier contenant uniquement du sable de rivière présente une perte de masse plus importante comparativement aux mortiers dont la composition contient du sable de carrière. Le tableau V.2 présente la synthèse des valeurs de perte de masse à l'issue de la période d'exposition. Le traitement de ces valeurs de perte de masse est illustré sur les histogrammes de la figure V.9.

Tableau V. 2 : valeurs de perte de masse des mortiers exposés à une attaque d'acide chlorhydrique

Perte de masse (%)	MSS 100	MSA 50	MSA 100	MSG 50	MSG 100	MSR 50	MSR 100
Valeurs moyennes	3,8	3,1	2,8	3,1	2,5	3,0	2,6
Ecart types	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1

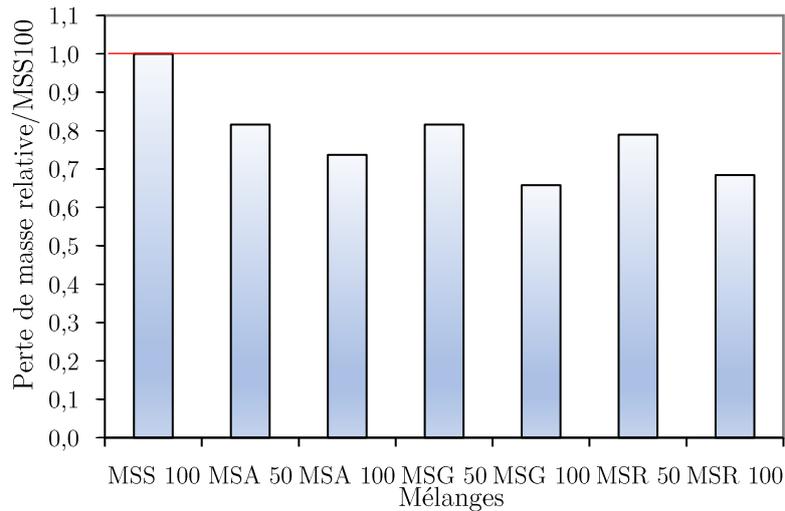


Figure V. 9 : Perte de masse relative à celle du mortier MSS100

Du point de vue de la résistance à l'attaque à l'acide chlorhydrique, les mortiers composés uniquement de sable de concassage se dégradent moins que le mortier composé de 100% de sable de rivière (voir Figure V.9). Le niveau de perte de masse des mortiers composés de 50 % de sable de rivière semble être similaire quel que soit la source de provenance du sable concassé. Toutefois, ces dégradations physiques (en termes de perte de masse) restent faibles vis-à-vis de l'attaque à l'acide chlorhydrique. Cela peut être expliqué par le caractère d'agressivité modérée de la solution (0,5 % (en volume) d'HCl).

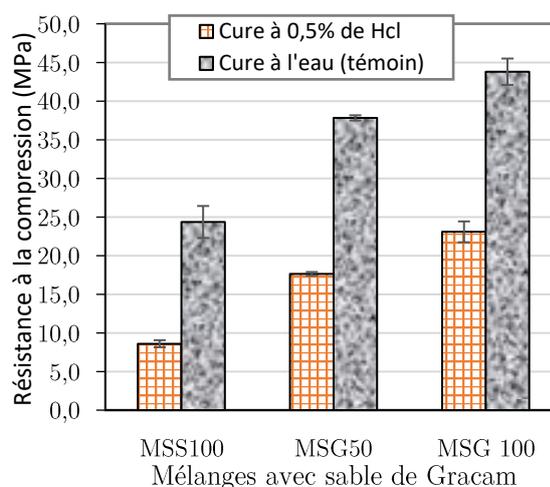
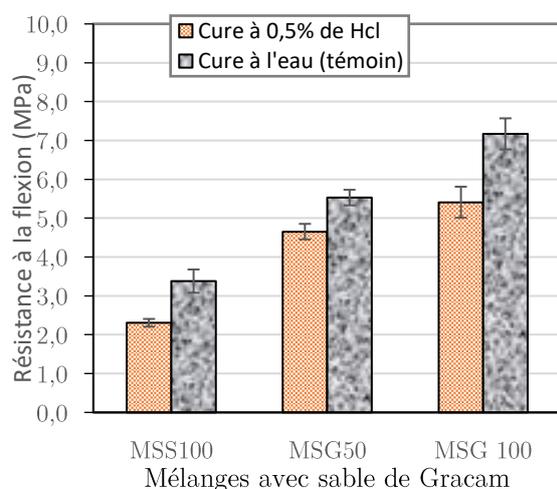
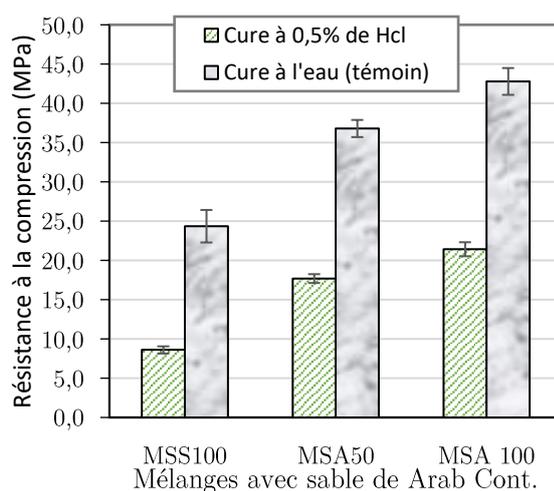
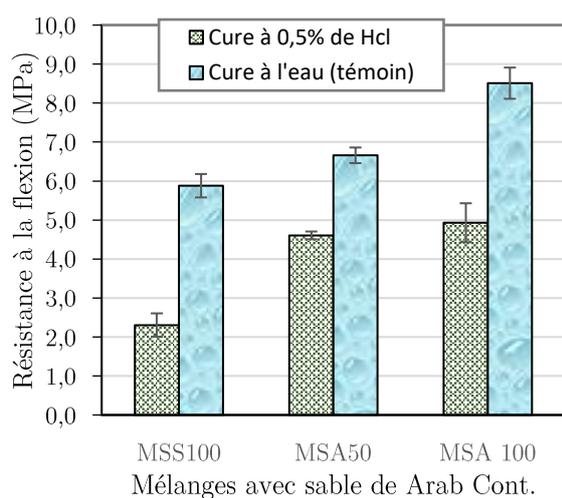
Le fuseau des courbes de perte de masse (figure V.8) montre que les pertes de masse des mortiers composés de 50 % de sable de concassage sont comprises entre celles du mortier de sable de rivière et celles des mortiers de 100 % de sable de concassage.

V.3.2.2 Effet sur la résistance à la compression et à la flexion

Les résistances à la compression et à la flexion des mortiers exposés à l'attaque à l'acide chlorhydrique sont déterminées au bout des 259 jours d'exposition. Les résistances mesurées sont comparées à celles des échantillons témoins, immergés dans de l'eau. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau V.3 et illustrés par les diagrammes de la figure V.10.

Tableau V. 3 : Résistance à la compression et à la flexion des mortiers exposés à 0,5 % de HCl et conservés dans de l'eau pendant 259 jours.

Cure	Résistances	MSS	MSA	MSA	MSG	MSG	MSR	MSR
		100	50	100	50	100	50	100
Cure dans 0,5% de HCl	Flexion (MPa)	2,3	4,6	4,9	4,7	5,4	4,4	5,0
	Ecart type	0,3	0,1	0,5	0,2	0,4	0,2	0,3
	Compression (MPa)	8,6	17,7	21,4	17,6	23,1	18,1	21,8
	Ecart type	0,5	0,6	0,9	0,2	1,3	1,0	0,9
Cure dans l'eau	Flexion (MPa)	5,9	6,7	8,5	6,5	9,2	6,7	9,9
	Ecart type	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5
	Compression	24,4	36,8	42,8	37,8	43,8	38,2	44,2
	Ecart type	2,1	1,1	1,7	0,3	1,7	0,8	2,1



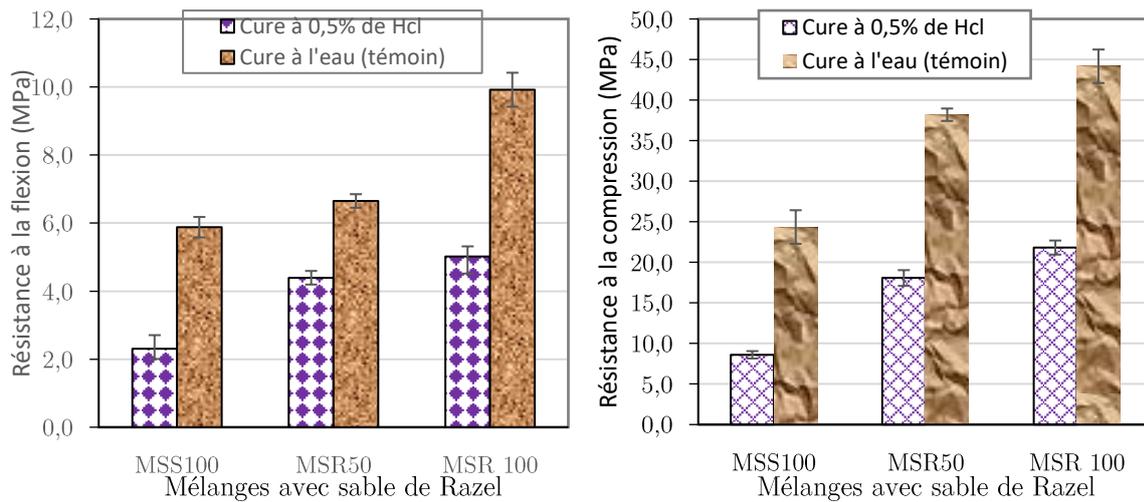


Figure V. 10 : Résistances à la compression et à la flexion des échantillons de mortiers en solution de 0,5 % de HCl et dans de l'eau

Les analyses des caractéristiques mécaniques présentent une perte élevée de résistance lorsque les échantillons sont conservés dans des solutions acide. A l'issue des 259 jours d'immersion dans la solution contenant 0,5 % de HCl, les calculs du coefficient de perte des performances mécaniques sont consignés dans le tableau V.4. Les figures V.11 (a et b) présentent les variations de masse relatives à la fin de la période d'exposition à l'attaque de HCl, comparativement à celle du mortier de sable de rivière MSS100.

Tableau V. 4 : Pertes de performances mécaniques après attaque de HCl

Mortiers	MSS	MSA	MSA	MSG	MSG	MSR	MSR
	100	50	100	50	100	50	100
Pertes (%)	Résistance à la compression	64,7	50,0	48,9	53,4	47,3	48,7
	Résistance à la flexion	60,7	42,0	30,8	41,0	33,5	33,4

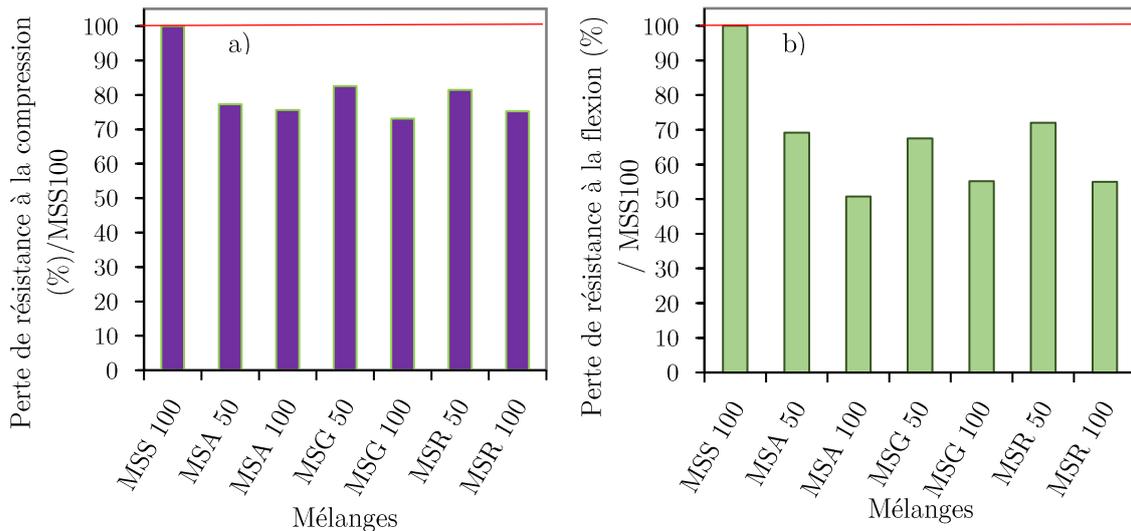


Figure V. 11 : Pertes de résistance à la compression (a) et à le flexion (b) des mortiers après attaque de HCl, relativement aux caractéristiques du mortier MSS100

L'étude a révélé que les éprouvettes de mortier composés uniquement du sable de rivière (MSS100) soumises à l'attaque de HCl ont subi la perte la plus élevée d'environ 60,7 % de leur résistance à la flexion par rapport aux mortiers témoins, contre 30,8 % pour le mortier MSA100, 33,5 % pour MSG100 et 33,4% pour MSR100 (Tableau V.3). Cette différence est illustrée par le graphique de la figure V.5b, sur laquelle on peut voir clairement l'écart relatif entre la résistance à la flexion des mortiers composés de 100% de sable concassé par rapport au mortier composé uniquement de sable de rivière. Ainsi, Les mortiers de sables concassés présentent de meilleures réactions par rapport à l'attaque au HCl.

On observe également qu'avec la substitution de 50% de sable de concassage, cette perte est de 30,8 % pour le mortier MSA50. Le résultat est similaire avec les mortiers des autres carrières.

Pour ce qui est de la résistance à la compression, le mortier composé de 100% de sable de rivière a diminué d'environ 64,7 %, contre 49,9 % pour les mortiers MSA100 et 47,3 % pour les mortiers MSG100 et 48,7 % pour MSR100, la diminution relative est beaucoup moins importante que celle de la résistance à la flexion (figure V.11a). En faisant la substitution de 50% de sable de rivière, les pertes de résistances à la compression et à la flexion semblent être modérées.

V.3.2.3 Analyse visuelle des dégradations

Une observation visuelle des échantillons a été faite à la fin de la période d'immersion dans la solution. Cela a permis d'apprécier leur niveau de dégradation. Les images de la figure V.12 montrent l'état de dégradation de quelques éprouvettes après 259 jours d'immersion dans la solution de 0,5 % de HCl.

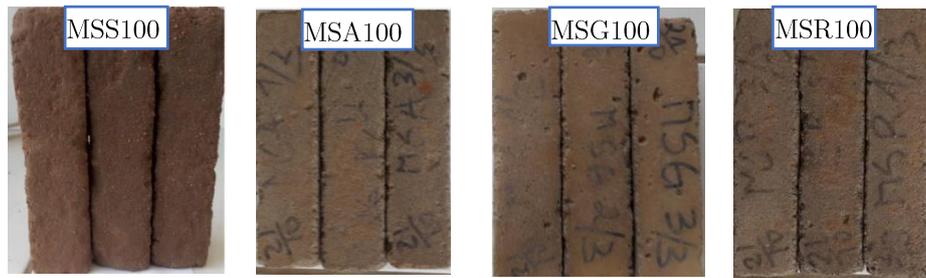


Figure V. 12 : Images de dégradation des échantillons de mortiers après immersion de 259 jours dans une solution de HCl

On observe que les arrêtes des éprouvettes prismatiques des mortiers MSA100, MSG100 et MSR00 n'ont pas été fortement endommagées. Ce n'est pas le cas du mortier MSS100 pour lequel l'attaque a été plus dommageable et les éprouvettes plus érodées. Toutefois, on observe que les dégradations sont plus superficielles et visibles sur les arrêtes et les angles des échantillons. Le niveau de déformation explique les faibles valeurs de perte de masse observées sur les échantillons.

V.3.3 Réaction au sulfate de sodium Na_2SO_4

La dégradation des bétons liée à la réaction sulfatique reste l'une des pathologies rencontrées dans les ouvrages d'art. En effet, cette dégradation est principalement due à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation de gypse ou d'ettringite secondaire expansive [DIVET, 2000]. L'essai a consisté à introduire les éprouvettes de mortier, conservées dans une solution saturée de sulfate de sodium (Na_2SO_4) dosée à 5% (en volume), pendant 259 jours et de suivre l'évolution de sa masse suivant le même procédé que celui décrit pour l'attaque au HCl. Les caractéristiques mécaniques ont été également déterminées à la fin de la période d'exposition et une observation visuelle des échantillons a été faite. Les caractéristiques mécaniques des mortiers après immersion sont également comparées à celles des mortiers témoins conservés dans de l'eau sur la même période.

V.3.3.1 *Variation de masse*

L'essai consiste à suivre l'évolution des masses pendant toute la période d'exposition. Le protocole de mesure est le même que celui de l'exposition à l'attaque à l'acide chlorhydrique. Les figures V.13 (a, b et c) présentent respectivement les évolutions de masse en fonction du temps des mortiers confectionnés avec 100 % et 50 % de sables des carrières Arab Contractor, Gracam et Razel exposés au sulfate de sodium. La figure V.14 récapitule le fuseau obtenu de toutes les variations de masse des mortiers avec les granulats des trois carrières et le sable de rivière. Les variations de masse sont calculées de la même manière que celles obtenues pour l'exposition à l'acide chlorhydrique.

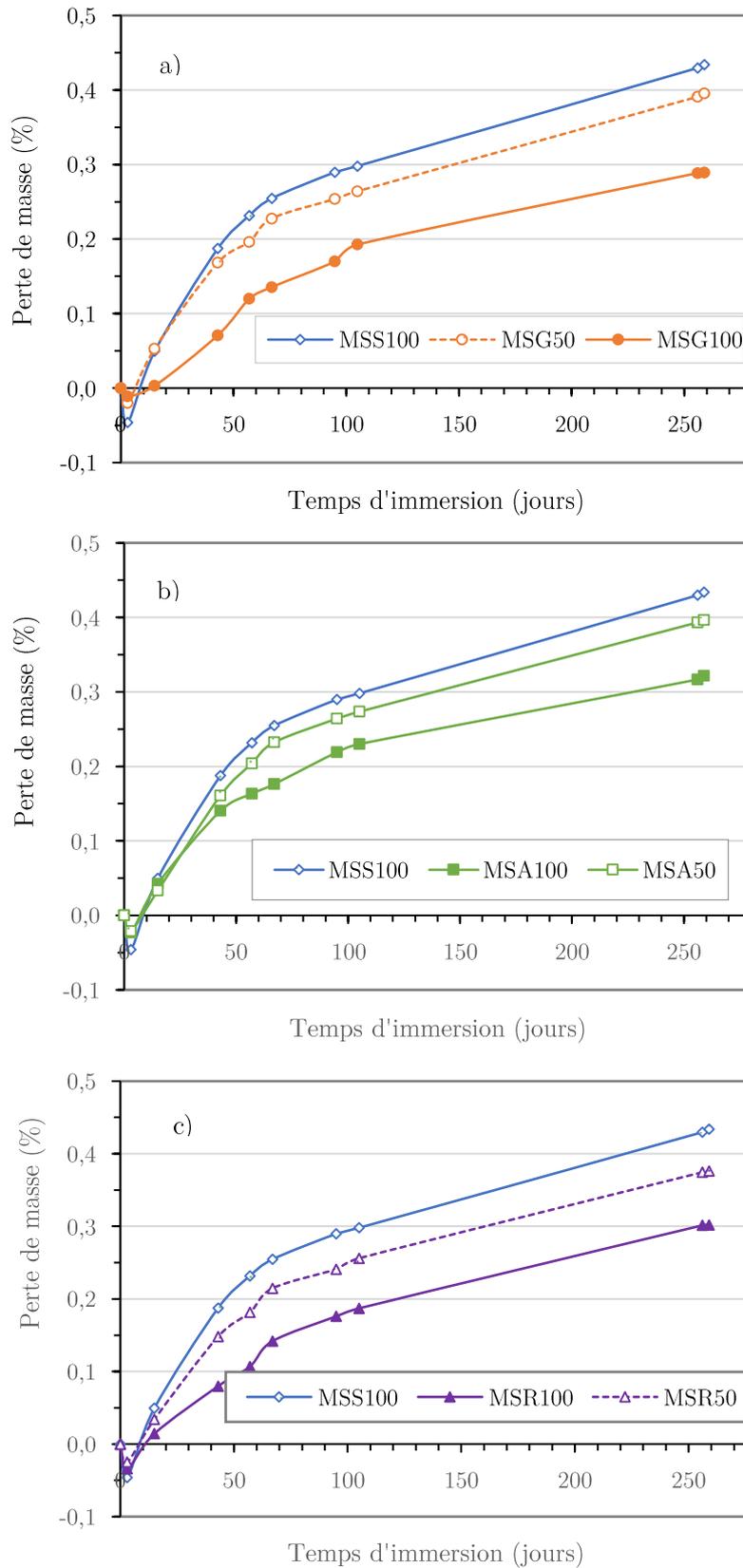


Figure V. 13 : Variation de masse de mortier MSS100, MSA50 et MSA100 (a) ; MSS100, MSA50 et MSA100 ; (b) ; MSS100, MSR50 et MSR100 (c) en solution de Na_2SO_4

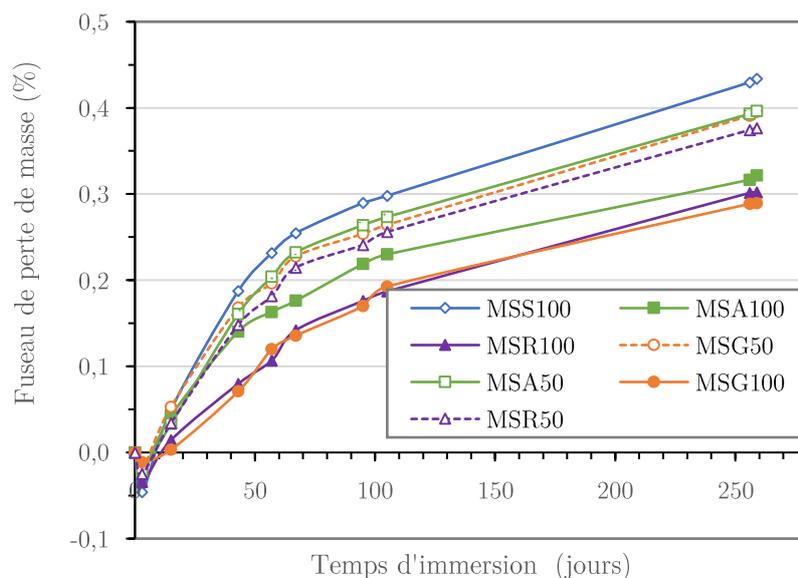


Figure V. 14 : Fuseau des variations de masse des différents mortiers en solution de Na_2SO_4

Comparativement à l'attaque à l'acide chlorhydrique, on observe que les pertes de masse des échantillons soumis à la solution de sulfate de sodium sont moins importantes. Toutefois, et comme pour l'attaque à l'acide chlorhydrique, les valeurs les plus élevées sont également obtenues pour sur le mortier composé de sable de rivière. La cinétique de perte de masse est faible dans l'ensemble. Les valeurs de perte de masse obtenues au bout de la période d'immersion de 259 jours sont consignées dans le tableau V.5.

Tableau V. 5 : valeurs de perte de masse des mortiers exposés à une attaque de Na_2SO_4

Perte de masse (%)	MSS 100	MSA 50	MSA 100	MSG 50	MSG 100	MSR 50	MSR 100
Valeur moyenne	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3

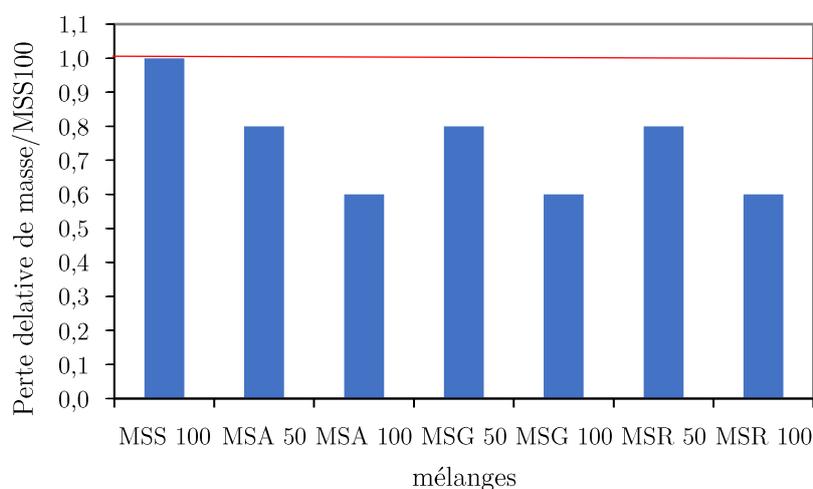


Figure V. 15 : Perte de masse des mortiers après attaque de Na_2SO_4 relativement au mortier MSS100

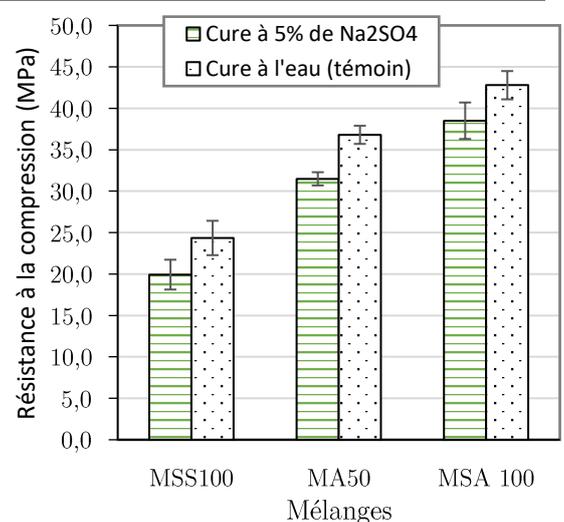
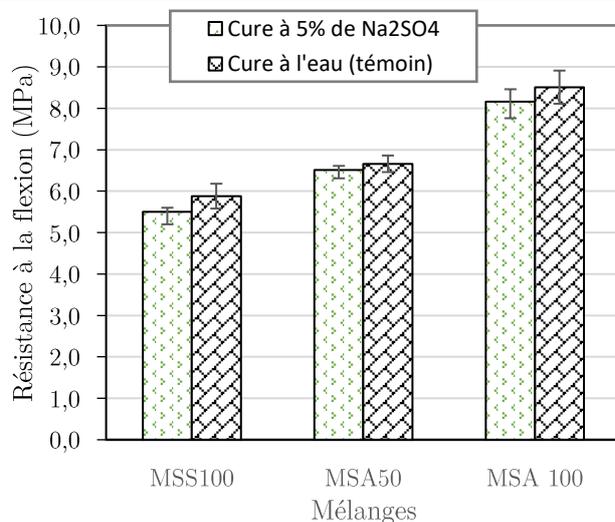
On peut observer que la perte de masse est quasiment la même pour toutes les formulations et est inférieure à 0,5 % sur toute la période d'exposition. Ces faibles valeurs de perte de masse sont attribuées à la formation continue d'hydrates, ainsi que de couches denses de calcite (CaCO_3) sur la surface des éprouvettes [Rozière, 2007]. Il y a donc comme une compensation d'une part de la perte de matière liée à l'attaque des sulfates et un gain de poids lié à la formation de ces calcites.

V.3.3.2 Effet sur la résistance à la compression et à la flexion

La résistance à la compression et à la flexion des mortiers formulés et exposés à l'attaque au Na_2SO_4 ont été déterminés au bout de 259 jours d'exposition. Les valeurs obtenues sont comparées à celles déterminées avec des échantillons témoins immergés dans de l'eau. Les résultats sont consignés dans le tableau V.6. Ces résultats sont illustrés sur les graphiques de la figure V.12.

Tableau V. 6 : Résistances à la compression et à la flexion des mortiers exposés à 5 % de Na_2SO_4 et à l'eau pendant 259 jours.

Cure	Résistances	MSS	MSA	MSA	MSG	MSG	MSR	MSR
		100	50	100	50	100	50	100
Cure dans 5 % de Na_2SO_4	Flexion (MPa)	5,7	6,5	7,3	6,3	8,2	6,4	8,6
	Ecart type	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5
	Compression (MPa)	19,9	31,5	38,5	31,1	39,6	31,5	40,4
	Ecart type	2,1	1,1	1,7	0,3	1,7	1,1	2,0
Cure dans de l'eau	Flexion (MPa)	5,9	6,7	8,5	6,5	9,2	6,6	9,92
	Ecart type	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,50
	Compression	24,4	36,8	42,8	37,8	43,8	38,2	44,2
	Ecart type	2,1	1,2	1,7	0,3	1,7	0,8	2,1



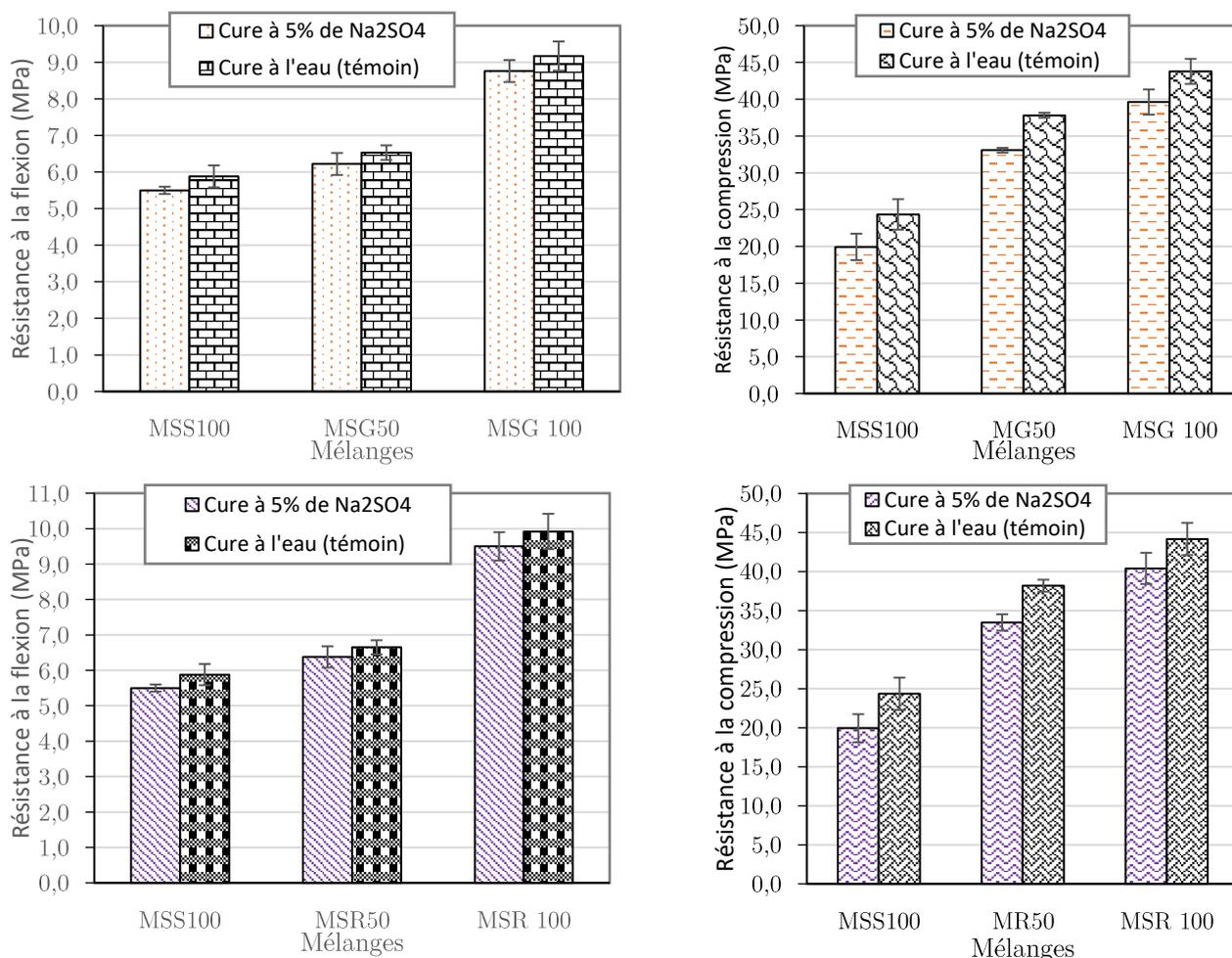


Figure V. 16 : Résistances à la compression et à la flexion des échantillons de mortiers en solution de 0,5% de Na₂SO₄ et dans de l'eau.

A l'issu des 259 jours d'immersion dans la solution contenant 5 % de Na₂SO₄, les résultats de perte des performances mécaniques sont consignés dans le tableau V.7. Les figures V.17 (a et b) présentent les variations de masse relatives à la fin de la période d'exposition à l'attaque de Na₂SO₄, comparativement à celle du mortier de sable de rivière MSS100.

Tableau V. 7 : Pertes de performances mécaniques après attaque de Na₂SO₄

Mortiers	MSS	MSA	MSA	MSG	MSG	MSR	MSR	
	100	50	100	50	100	50	100	
Pertes (%)	Résistance à la compression	18,2	14,4	10,0	12,6	8,4	12,5	8,5
	Résistance à la flexion	6,4	4,7	4,1	4,6	4,3	4,4	4,2

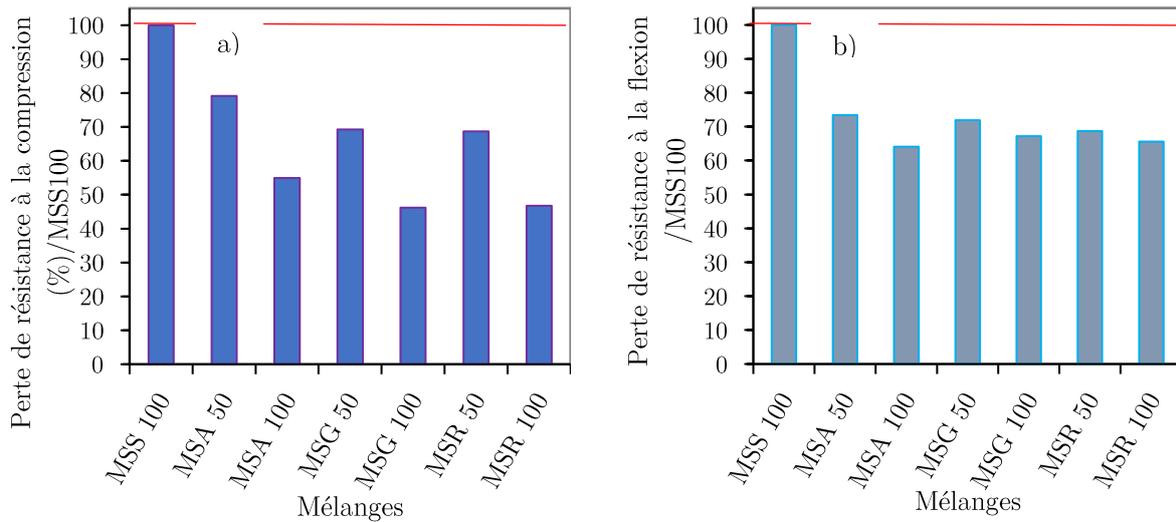


Figure V. 17 : Pertes de résistance à la compression (a) et à le flexion (b), des mortiers relativement à caractéristiques mécaniques du mortiers MSS100 après attaque de Na_2SO_4

L'étude a révélé que les éprouvettes de mortier composées uniquement du sable de rivière (MSS100) soumises à l'attaque de Na_2SO_4 ont subi la perte globalement moins importante que celles observées de HCl. Ces pertes sont estimées à environ 18,2 % de leur résistance à la compression pour les mortiers MSS100, contre 10,0%, 8,4% et 8,5% respectivement pour les mortiers MSA100, MSG100 et MSR100 (Tableau V.7). Cette différence est illustrée par le graphique de la figure V.5a, sur laquelle on peut voir clairement l'écart relatif entre la résistance à la compression des mortiers composés de 100% de sable de rivière et celle des mortiers composés de 100% de sable de carrière. Ainsi, les mortiers de sables concassés présentent de meilleures réactions par rapport à l'attaque au Na_2SO_4 . On observe également qu'avec la substitution de 50% de sable de concassage, cette perte est de 18,2 % pour le mortier MSA50, 12,4 %. Le résultat est similaire avec les mortiers des autres carrières.

Pour ce qui est de la résistance à la flexion, le mortier composé de 100% de sable de rivière a diminué d'environ 6,4 %, contre 4,1 % pour les mortiers MSA100 et 4,3 % pour les mortiers MSG100 et 4,2 % pour MSR100, la diminution relative est beaucoup moins importante que celle de la résistance à la flexion (figure V.17b). En faisant la substitution de 50% de sable de rivière, les pertes de résistances à la compression et à la flexion semblent être modérées.

V.3.3.3 Analyse visuelle des dégradations

Les images de la figure V.18 montrent les échantillons de mortier après la période d'immersion dans la solution de Na_2SO_4 .

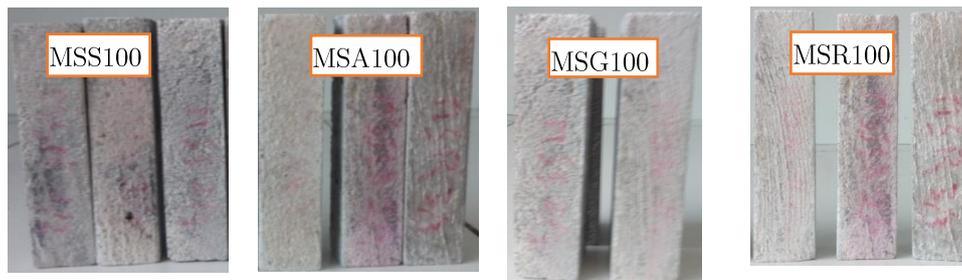
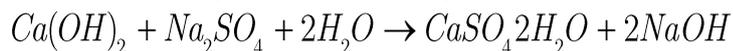


Figure V. 18: Images de dégradation des échantillons de mortiers après immersion dans la solution de Na_2SO_4

On peut observer clairement qu'il n'y a presque pas de dégradation physique sur les échantillons de mortier. Cela est en accord avec les très faibles valeurs de perte de masse obtenues après 259 jours de conservation dans la solution de 5 % de Na_2SO_4 . L'immersion complète a provoqué une attaque sulfatique externe moins importante que celle causée par l'acide chlorhydrique. Par contre, on observe la formation de sodium (dépôt blanchâtre) sur la surface des échantillons de mortier. Cela est expliqué par le fait qu'en présence de sulfate de sodium, l'hydroxyde de calcium réagit pour former le gypse suivant l'équation V.6 [Wee et al., 2000].



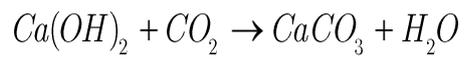
Conformément aux similitudes observées dans la composition chimique des sables concassés, et compte tenu des résultats mécaniques obtenus, nous nous limiterons dans la suite de l'étude aux mortiers contenant uniquement du sable de rivière (MSS100), celui contenant 50% de mélange des deux types de sable (MSR50), ainsi qu'au mortier de sable concassé de la carrière de Razel (MSR100).

V.3.4 Carbonatation accélérée sur mortiers et bétons

L'essai de carbonatation accélérée a été mené selon la procédure recommandée par la norme française XP P18-458 (ANOR, 2008), telle que décrite dans le chapitre II. L'objectif est de déterminer rapidement la potentialité des bétons et mortier à se carbonater. Nous proposons ici de faire une analyse de l'influence de l'utilisation du sable de concassage sur la carbonatation de mortiers et bétons.

V.3.4.1 Profondeur de carbonatation

La profondeur de carbonatation a été déterminée sur les échantillons de mortier à 0, 3, 7, 14, 21 et 28 jours de conservation dans une enceinte climatique régulée à la température de 20 °C, à une humidité relative de 65 % HR et à 3 % de CO_2 . Baroghel-Bouny [V. Baroghel-Bouny, 1994] a montré que la vitesse de carbonatation est maximale pour des humidités relatives entre 50 et 65 % ce qui explique le choix de cette humidité relative. La teneur en CO_2 de l'air ambiant est comprise entre 0,03 % en milieu rural et plus de 0,1 % en milieu urbain [Bertolini et al., 2004]. Nous rappelons ici que le bilan macroscopique de la carbonatation de la portlandite est donné par l'équation :



La figure V.19 présente les profondeurs de carbonatation déterminées sur des éprouvettes de mortiers MSS100, MSR50 et MSR100. La figure V.20 présente l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la durée de carbonatation.

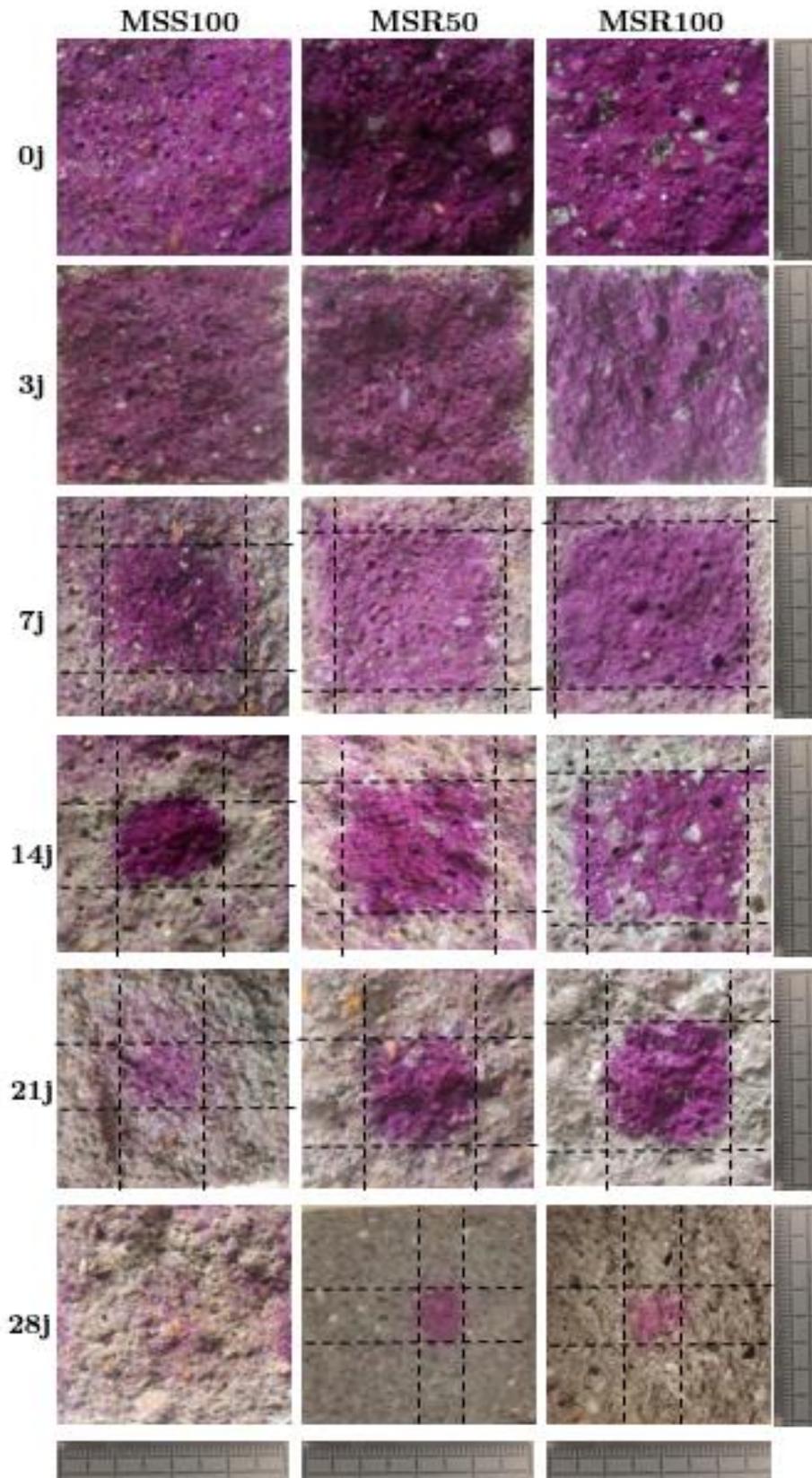


Figure V. 19 : Profondeur de carbonatation après la pulvérisation de la phénolphtaléine.

Tableau V. 8 : Valeurs de la profondeur de carbonatation des différents mortiers.

Durée de cure (jours)		3	7	14	21	28
Temps ^{0,5} (jour)		1,73	2,65	3,74	4,58	5,29
MSS100	Profondeur de carbonatation (mm)	2	7	13	16	20
	Ecart moyen	0,1	0,6	0,5	0,5	0
MSR50	Profondeur de carbonatation (mm)	1,5	6	10	14	16
	Ecart moyen	0,2	0,4	0,7	0,4	0,5
MSS100	Profondeur de carbonatation (mm)	1	4	8	12	15
	Ecart moyen	0,2	0,4	0,7	1	0,2

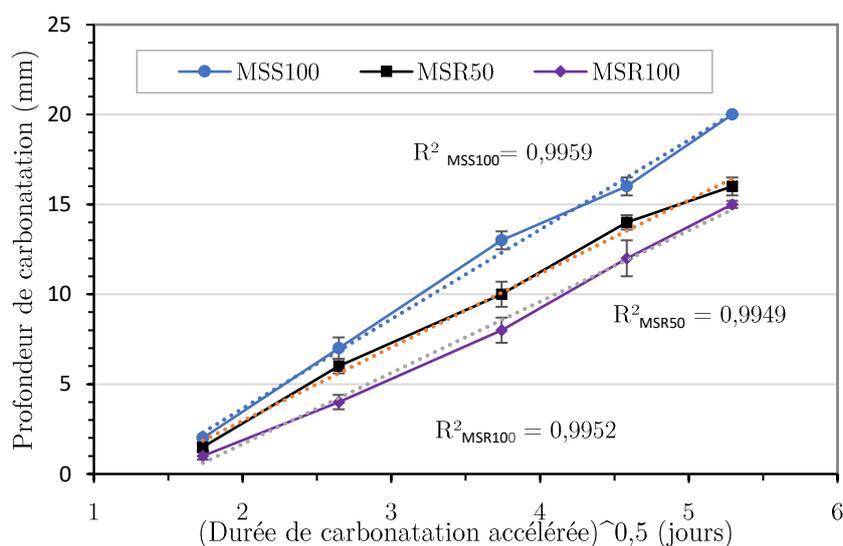


Figure V. 20 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la durée de carbonatation

Après pulvérisation de l'indicateur coloré, la phénolphthaléine, la zone non carbonatée devient rose et la zone carbonatée devient incolore. Pour toutes les formulations, on peut observer que la profondeur de carbonatation augmente avec la durée de la carbonatation. Pour tous les mortiers, la profondeur de carbonatation augmente avec la durée de la carbonatation. L'étude montre que la profondeur de carbonatation est corrélée linéairement avec la racine carrée de la durée de carbonatation, avec des coefficients de corrélation linéaire proches de 1. Les observations faites sont en accord avec les résultats des travaux de [Chaussadent, 1999] qui a montré qu'à un instant t de la vie d'un ouvrage, la profondeur de carbonatation est linéairement exprimée en fonction de la racine carrée du temps.

La cinétique de la profondeur de carbonatation est globalement la même pour les trois mortiers, mais la profondeur de carbonatation du mortier MS100 est plus grande que

celles des deux autres mortiers (MSR100 et MSR50) à toutes les durées. A 3 jours, tous les mortiers ont plus ou moins la même valeur de profondeur de carbonatation. Après 7 jours d'exposition à la carbonatation accélérée, l'écart commence à être observé, les zones colorées des échantillons de MSS100 commencent à être plus importantes que celles des mortiers MSR50 et MSR100. A 21 jours d'exposition, les zones colorées ont été continuellement réduites, et leur pourcentage de carbonatation a atteint 77,5 %, 68,1 % et 59,5 %, respectivement pour les mortiers MSS100, MSR50 et MSR100. A 28 jours, le mortier MSS100 est entièrement carbonaté, contrairement aux mortiers MSR50 et MSR100 dont les profondeurs moyennes de carbonatation sont de 15 et 16 mm, respectivement, sur les 20 mm de profondeur maximale de carbonatation.

V.3.4.2 Effet de la carbonatation sur la porosité de mortiers

Dans cette partie, on étudie l'effet de la carbonatation sur la porosité du mortier à 28 jours de cure. Le tableau V.9 présente les résultats de porosité accessible à l'eau obtenus sur des échantillons de mortiers MSS100, MSR100 et MSR50 carbonatés (C), ainsi que des mortiers non carbonatés (NC). Les échantillons ont subi un pré conditionnement de 14 jours par séchage dans une étuve à 20°C et 50 % d'humidité relative. La figure V.21 illustre les résultats obtenus.

Tableau V. 9 : Variation des valeurs de porosité avant et après carbonatation.

Type	MSS 100		MSR 100		MSR 50	
	NC	C	NC	C	NC	C
Porosité (%)	25,4	22,9	18,4	17,8	20,2	19,3
Ecart type	0,9	0,6	0,8	0,9	0,8	0,6
Variation (%)	9,9		3,1		4,0	

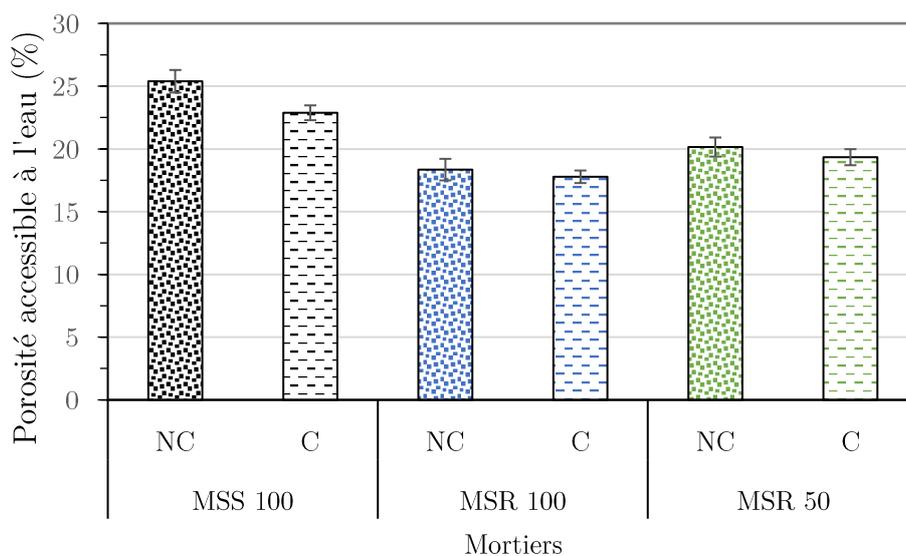


Figure V. 21 : Comparaison des valeurs de porosité accessible à l'eau des mortiers avant et après carbonatation

Comme le montre le tableau V.9, la diminution de la porosité est estimée à 9,9 % pour le mortier MSS100, 4,0 % pour le mortier MSR50 et 3,1 % pour le mortier MSR100. On peut également observer que plus la carbonatation est importante, plus la porosité a baissé. Cette diminution de porosité peut s'expliquer par le remplissage des pores par les hydrates néoformés dans les matériaux, avec variation des volumes molaires de la portlandite. En effet, la réaction relative à la transformation d'une mole de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en une mole de CaCO_3 par action de CO_2 , induit un accroissement du volume de la phase solide, donc une diminution de l'espace poreux [Thiery, 2005].

V.4 CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE

V.4.1 Structure des pores et microfissuration

L'effet de la dispersion granulaire sur la microstructure de la pâte des mortiers MSS100 et MSR50 et MSR100 est illustré à la figure V.22. Les observations faites sur sections polies permettent de comparer le schéma de microfissuration de mortiers.

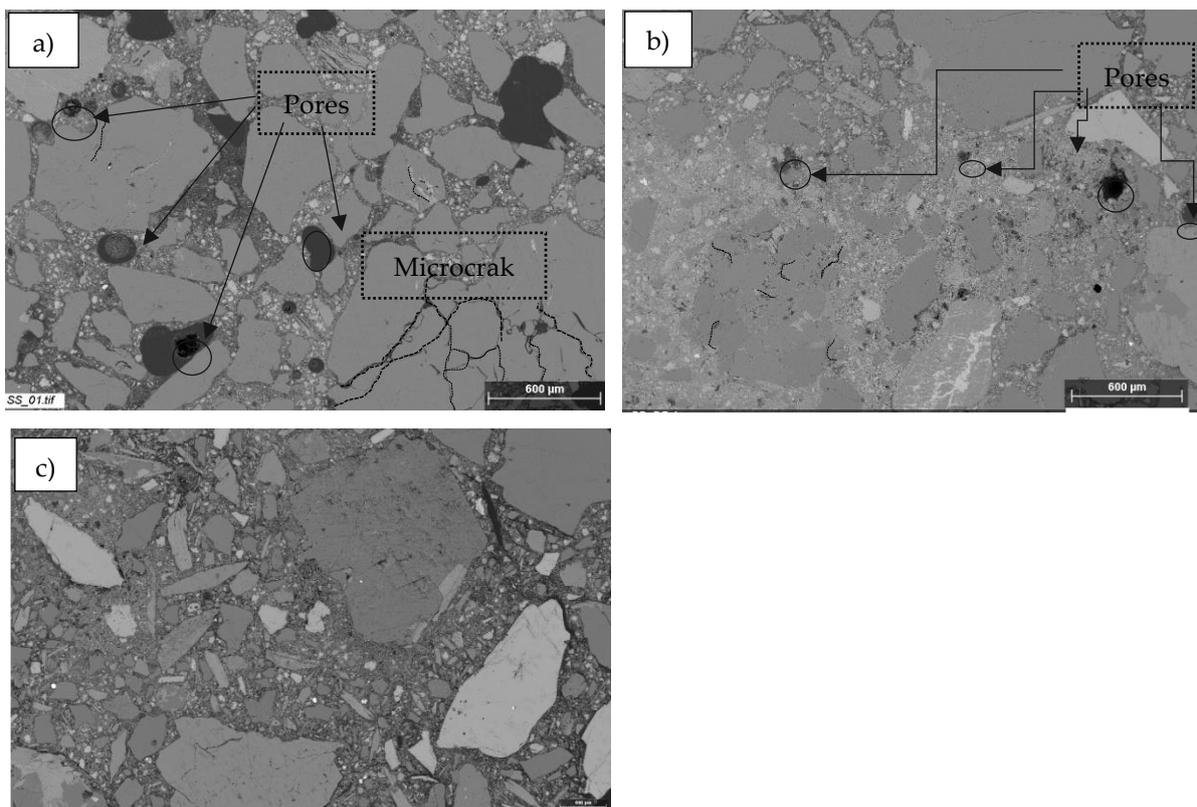


Figure V. 22 : Topographie MEB des surfaces polies de mortiers MSS100 (a) ; MSR50 (b) et MSR100 (c) MSR100.

Globalement, les images en mode électron rétrodiffusé ont montré des parties du ciment non hydraté apparaissant en blanc (beaucoup plus intense sur le MSS100 que sur le MSR100), des hydrates en gris moyen, des granulats en gris foncé et des vides en noir.

Grâce à ces observations au MEB, on peut facilement apprécier l'hétérogénéité de la porosité des mortiers avec du sable de rivière (figure V.22 a et b). La taille des pores observés peut s'étendre de quelques micromètres à quelques millimètres. On constate que le motif du réseau de microfissuration est plus important pour le mortier MSS100 que pour les deux autres (MSR50 et MSR100. De même que les mailles du réseau sont plus resserrées et l'ouverture des microfissures est beaucoup plus petite dans le cas du MSR100. Les images font apparaître qualitativement plus de porosité dans le MSS100 que dans le MSR100. De manière spécifique, des micropores légèrement moins ouverts (environ 10 μm) ont été observés sur le mortier MSR100 (figure 22.c). Ces micropores étaient plus ouverts (environ 25 μm) sur le mortier MSS100 (figure 22.a). Cette situation s'explique par le très faible taux de fines dans le sable de rivière et les résultats obtenus dans la section sur la porosité de l'eau. Cela justifie les résultats de porosité accessible à l'eau. Cette porosité apparaît sous la forme de zones noires au MEB.

On a également observé de petits canaux d'environ 1 à 2 μm à l'interface granulat/matrice de ciment pour le mortier MSR50, qui sont moins souvent observés sur le mortier MSS100. Cette différence peut être due à l'élimination de la pâte lors du traitement préliminaire de l'échantillon ou à des grains de sable légèrement délogés lors de l'étape de polissage [Dang J. et al., 2019]. Le développement de microfissures a également été observé dans les particules réactives des granulats et dans la pâte de ciment sur les échantillons de béton.

V.4.2 Cartographie chimique de l'analyse du silicium et du calcium

La figure V.23 présente une vue globale de la cartographie chimique EDS du silicium (Si) et du calcium (Ca) sur les bétons BSR0 (a) et BSR50 (c) après leur inclusion dans la résine et leur polissage, ainsi que les spectres correspondants à l'interface pâte-granulat : BSR0 (b) et BSR50 (d).

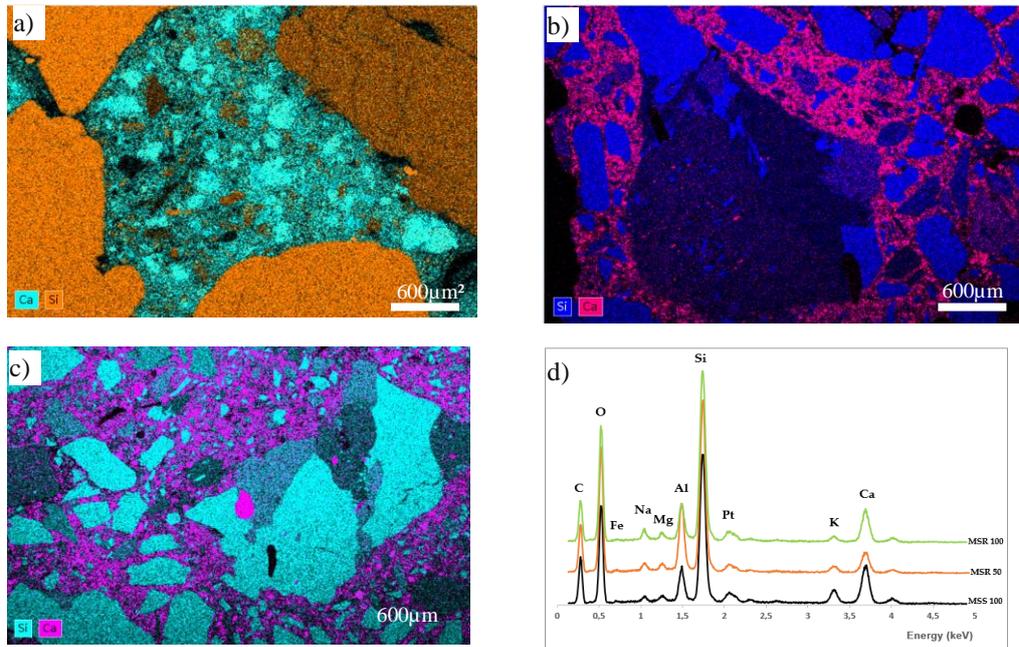


Figure V. 23 : Cartographie du silicium (Si) et du calcium (Ca) sur les pâtes de mortier MSR100(a) (Si : bleu, Ca : rose), MSR50 (b) (Si : bleu, Ca : rose), (MSR0 c) (Ca : bleu, Si : orange), (d) spectres EDX sur les mortiers.

L'analyse montre que le mortier composé uniquement de sable de rivière (Fig. V.23a) présentait plusieurs agglomérats de silice de forme irrégulière et à bords arrondis (en orange), dont la taille irrégulière allait de 20 μm à plusieurs centaines de micromètres, contrairement au mortier composé uniquement de sable concassé (Fig. V.23b). Cette observation peut s'expliquer par la forte teneur en silice (SiO_2) du sable de rivière. La présence de silice a été vérifiée par l'existence de silicium (Si) et d'oxygène (O_2) et par l'absence (presque totale) de calcium Ca, comme l'illustre le spectre (Fig. V.23c). La pâte de ciment riche en calcium (qui apparaît en rose dans la Figure V.23a et en bleu dans la Figure V.23c) a rempli les espaces entre les granulats. La pâte incorporait de fines particules contenant du mortier de sable concassé à 100 %, tandis que la pâte avec du mortier de rivière à 100 % de sable apparaissait plus poreuse avec une couleur bleue non homogène (la porosité apparaissait en noir ou en bleu foncé dans la pâte de ciment). En comparaison, la matrice cimentaire des mortiers de sables mélangés (Fig. V.23c) semblait plus homogène avec une meilleure dispersion granulaire. Le sable broyé comportait également quelques particules anguleuses (conséquence du broyage), ce qui a entraîné une différence de hauteur des pics entre les mortiers, que l'on peut observer sur le spectre EDS à l'interface pâte/granat, comme le montrent les courbes de la figures V.23d.

V.4.3 Modification de la microstructure du fait de la carbonatation

La figure V.24 montre des images MEB d'échantillons de mortier MSS100, MSR50 et MSR100 avant et après la carbonatation.

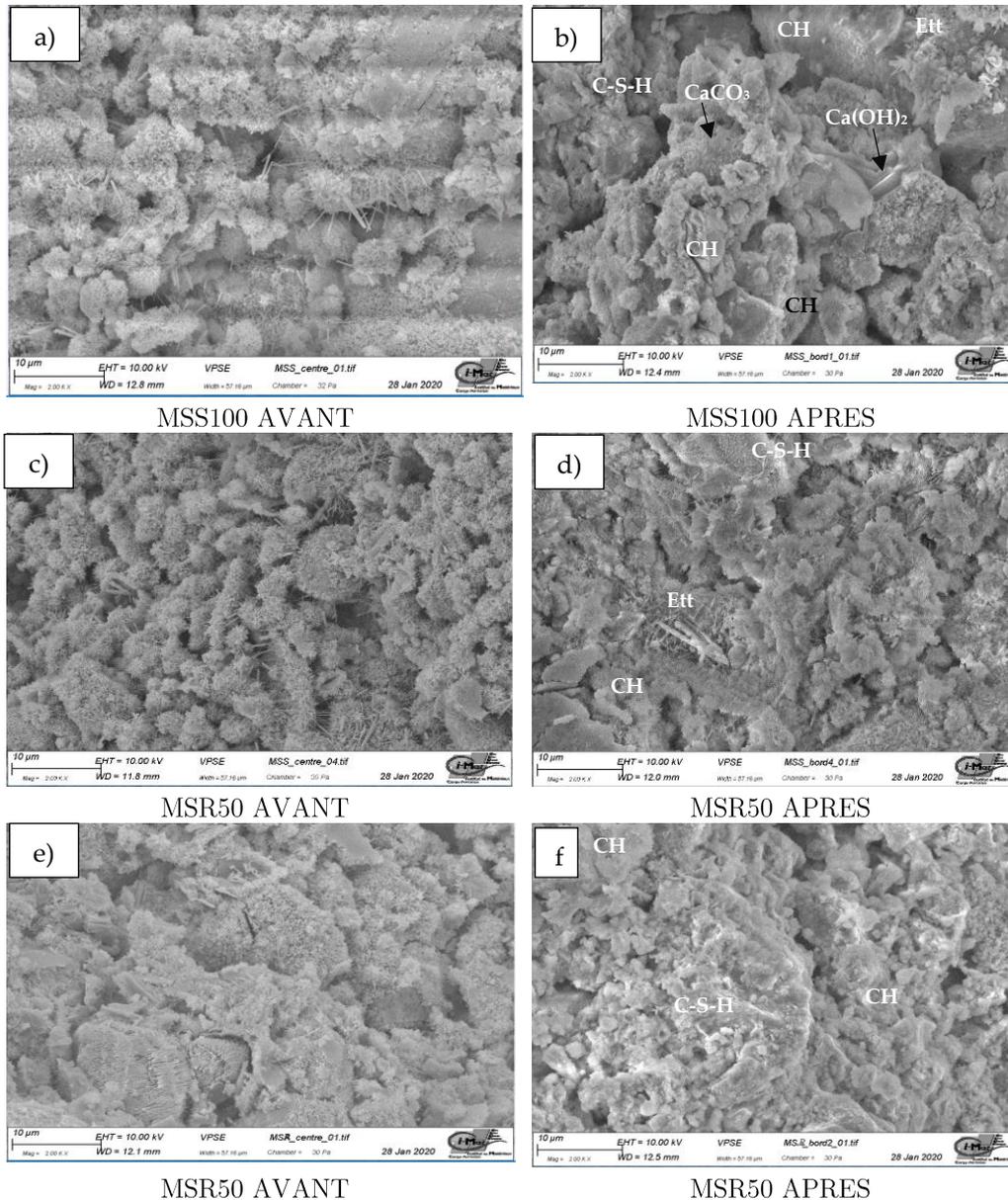


Figure V. 24 : Images MEB de mortier MSS100, MSR50 et MSR100 avant et après carbonatation

Les images de MEB expliquent bien les différences entre le C-S-H formé par l'hydratation du ciment sur chacun de ces mortiers. Cette différence serait attribuée aux valeurs différentes Si/Ca contenus dans les sables (cf. Chapitre III. §§5.1). En effet, une teneur plus élevée en Si/Ca et Al/Ca implique généralement la décalcification et la conversion du C-S-H en gel de silice et d'alumine [Shah et al., 2018]. En outre, en comparant les images MEB de MSS100 et MSR100 après carbonatation, il y a des différences dans la

taille et la morphologie des particules de CaCO_3 formées par la carbonatation. Après carbonatation, la microstructure des échantillons de mortier MSS100 présentait le CaCO_3 formé avec de petites particules rondes blanches qui a rempli les pores et a densifié la matrice. On observe également la présence de portlandite (CH) avec des formes cristallines dans les images de MEB des mortiers après carbonatation. Cette compacité explique la réduction de la porosité dans tous les mortiers.

V.5 CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de réaliser une analyse comparative des propriétés de durabilité et la microstructure des mortiers avec ou sans sable concassé. A la fin de ce chapitre, les principaux résultats ci-dessous ont été obtenus :

- L'utilisation du sable concassé semble augmenter légèrement le coefficient de capillarité des mortiers, comparativement au mortier de sable de rivière. Cela a été expliqué par l'absorption plus importante des sables de carrière par rapport au sable de rivière.
- Les mortiers composés de sable de concassage et de sable de rivière sont peu sensibles à l'attaque sulfatique externe dans les conditions expérimentales retenues.
- Les teneurs en ettringite, CSH et portlandite sont similaires dans les mortiers testés, tandis qu'une légère différence de carbonatation est apparue avec une carbonatation plus faible dans le sable concassé.
- Les propriétés de durabilité des mortiers MSA100, MSG100 et MSR100 semblent similaires. Comparativement au mortier composé uniquement de sable de rivière, ces mortiers ont présenté une meilleure résistance aux attaques chimiques. La substitution de sable de concassage à 50 % permet également d'avoir un gain de durabilité par rapport au mortier de sable de rivière, notamment une amélioration de la porosité et une limitation du risque de carbonatation.
- Les teneurs en Ettringite, CSH ou portlandite issues de l'analyse thermique sont similaires dans les mortiers testés, tandis qu'une légère différence de carbonatation est apparue avec une carbonatation plus faible dans le sable concassé qui présentait la plus faible porosité à l'eau (moindre accessibilité du gaz CO_2 dans la pâte). Les résultats sont confirmés par des mesures de DRX montrant l'apparition d'un petit pic de calcite dans le mortier ainsi que dans la portlandite. Ces analyses par DRX et ATG montrent la présence de la calcite CaCO_3 et la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) beaucoup représentée dans le échantillons de mortier avec les sables de carrière.

L'observation des échantillons au MEB a permis de bien interpréter les résultats de l'essai de porosité. Sur les images au MEB, il est observé que le nombre et la taille des pores au niveau de la microstructure du mortier de sable de rivière sont plus

importants que celles de mortier de sable de concassage. Ce qui confirme les tendances observées dans la comparaison des propriétés mécaniques.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

➤ CONCLUSION GENERALE

Dans l'alternative de proposer des solutions à l'appauvrissement des ressources en sable alluvionnaire, l'objectif de ce travail de recherche était de contribuer à la compréhension de l'influence du sable concassé (sable de carrière) en substitution du sable de rivière sur les propriétés de béton et mortier. Il vise à proposer une substitution optimale du sable de rivière par du sable de carrière avec des propriétés du béton obtenu similaires à celles du béton contenant uniquement du sable de rivière. Trois carrières de granulat situées dans la ville de Yaoundé ont été identifiées. Les granulats issus de ces différentes carrières ont été utilisés dans la formulation de mortier et béton. Le sable de rivière utilisé est issu du fleuve Sanaga.

L'analyse pétrographique des roches sources des granulats issus des trois carrières montre que ces roches sont issues d'un gisement de gneiss avec des microstructures et textures différentes. L'analyse minéralogique des sables et graviers par DRX a permis de quantifier l'ensemble des phases minéralogiques en tenant compte de leurs formules structurales. L'ensemble de ces phases minérales sont également celles qui constituent les phases majeures observées en analyse pétrographique. Une similitude de caractéristique est observée pour les granulats. Les masses volumiques des gravillons diffèrent peu d'une carrière à une autre ainsi que le coefficient d'absorption. Le sable de carrière présente une absorption plus élevée que celle du sable de rivière compte tenu de sa forte teneur en particules fines. Par rapport aux tests mécaniques réalisés, ces gravillons ont une faible résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure. Toutefois, les valeurs moyennes du coefficient Los Angeles obtenues sont inférieures à la limite recommandée. Ces gravillons sont donc qualifiés pour être utilisés dans la confection de bétons.

La formulation de différentes compositions de béton met en évidence l'influence de la proportion de substitution de sable de rivière par le sable de carrière sur l'ouvrabilité. Une forte substitution de sable de rivière entraîne une baisse de l'affaissement au cône d'Abrams. Cette variation d'affaissement semble être liée à forte teneur en particules fines du sable de carrière. Ce comportement ne dépend pas de la carrière dont est issu le sable. Comme recommandation, il serait nécessaire de faire varier le volume de pâte de la composition ou utiliser un fluidifiant afin de maintenir la même ouvrabilité que le béton contenant uniquement le sable de rivière.

Quant aux essais mécaniques réalisés, l'étude révèle globalement une diminution non significative des valeurs de la résistance à la compression entre les bétons BSA0 et BSA50, BSG0 et BSG50, BSR0 et BSR50 de l'ordre de 5,1%, 1,1%, 1,7% respectivement. La substitution du sable de rivière par du sable concassé dans les proportions de 70 % à 100 % semble avoir une influence significative sur la résistance à la compression et à la

traction du béton. Par contre, les bétons de 50 % de mélange des deux sables présentent des résistances proches de celle composé uniquement du sable de rivière.

Le béton composé de 50 % de sable concassé présente un module d'élasticité comparable à celui du béton de sable de rivière. Une réduction d'environ 5,8 % de la valeur du module d'élasticité a été observée par rapport au béton de sable de rivière.

Les mesures du coefficient de capillarité réalisée sur des formulations de mortier montrent une légère augmentation de la valeur de ce coefficient dans la formulation contenant du sable de carrière. L'utilisation du sable de concassage à 50 % dans la formulation de béton permet d'avoir un gain de durabilité, notamment une amélioration de la porosité, une limitation du risque de carbonatation et une meilleure résistance aux attaques chimiques à l'acide chlorhydrique et au sulfate de sodium.

L'analyse thermogravimétrique (ATG) a révélé que l'introduction de sable concassé n'a pas eu d'impact important sur le développement des phases cimentaires. Les teneurs en Ettringite, CSH ou portlandite issues de l'analyse thermogravimétrique sont similaires dans les mortiers testés, tandis qu'une légère différence de carbonatation est apparue avec une carbonatation plus faible dans le mortier de sable concassé qui présentait la plus faible porosité à l'eau.

Les observations au MEB ont permis de bien comprendre les résultats de la porosité à l'eau. Il a également été constaté que la structure de microfissuration est plus importante pour le mortier de 100 % de sable de rivière par rapport à celui avec 50 % de mélange des deux types de sable. Ce qui confirme les tendances observées dans la comparaison des propriétés mécaniques.

➤ PERSPECTIVES

Au regard des données extraites de la synthèse bibliographique, ainsi que des résultats obtenus dans la présente démarche expérimentale, nous démontrons l'avantage de substituer le sable alluvionnaire par du sable concassé de carrières dans la fabrication de mortier ou de béton. Cette possibilité est d'autant plus intéressante dans les régions où la disponibilité de sable de rivière est réduite. Le sable de concassage constitue ainsi une solution au problème de surexploitation des sables de rivière.

Ce travail de recherche est loin d'être exhaustif car de nombreuses questions demeurent en suspens. De ce fait, et pour compléter la compréhension de l'influence de sable concassé sur les propriétés des bétons et mortiers, quelques axes de recherche se dégagent :

- Etude de la résistance à haute température des bétons de sable de concassage ;
- Etude des caractéristiques des bétons de sables de carrières avec plusieurs classes différentes de ciment et en faisant varier le rapport E/C ;
- Etude des bétons de sable concassé de plusieurs sources minéralogiques.
- Etudier l'influence du sable obtenus de différentes carrières afin d'analyser l'influence de la nature minéralogique du sable de concassage sur les propriétés du béton et du mortier ;

- Stabilisation du retrait du béton de sable de concassage par l'utilisation des adjuvants ;
- Etude de la durabilité : diffusivité des ions chlorures, phénomène d'alcali réaction ;
- Pour compléter ce travail expérimental, l'aspect modélisation est envisagé dans la suite de cette étude, dans le but de fournir des modèles permettant de prédire le comportement thermo-mécanique du béton à base de sable concassé, comparativement à celui à base de sable de rivière.

➤ **ARTICLE DE JOURNAL INTERNATIONAL**

Emmanuel Elat, Prosper Pliya, Alexandre Pierre, Michel Mbessa and Albert Noumowé
Microstructure and Mechanical Behavior of Concrete Based on Crushed Sand Combined
with Alluvial Sand : *MDPI journal/civil Eng* : **Impact Factor** : 3.057 (2019/2020).
Civil Eng **2020**, 1(3), 181-197 ; <https://doi.org/10.3390/civileng1030011>

➤ **ARTICLES DE SEMINAIRES INTERNATIONAUX AVEC
PROCEEDINGS EDITES**

Emmanuel Elat, Alexandre Pierre, Prosper Pliya, Myriam Duc, Michel Mbessa, Albert
Noumowé
Mechanical and mineralogical characteristics of mortar with crushed and river sand.
Conférence internationale organisée (en ligne) par la Fédération Internationale du
Béton : **13th fib International PhD-Symposium In Civil Engineering 2020** .
Publisher : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
https://phdsymp2020.sciencesconf.org/data/pages/Proceedings_phdsymp_2021.pdf

Emmanuel Elat, Alexandre Pierre, Prosper Pliya, Albert Noumowé, Michel Mbessa
Eude expérimentale du comportement mécanique de bétons à base de sable de carrière
combiné au sable alluvionnaire :
Publication dans le numéro spécial de l'AJCE 2020 (Spécial issue RUGC 2020) :
<https://rugc20.sciencesconf.org>

REFERENCES

- Abbas, A., Carcasses, M., Ollivier, J.-P., (1999). Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Mater. Struct.* 32, 3–8. <https://doi.org/10.1007/bf02480405>.
- Achour, T., (2007). Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : Cas des granulats calcaires tunisiens (phdthesis). Université Henri Poincaré - Nancy 1. Disponible sur : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748324>.
- Acker, P., (1992). Retraits et fissurations du béton. Consulté le : Mai 07, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://trid.trb.org/view/1012559>.
- Acker, P., Ulm, F.-J., (2001). Creep and shrinkage of concrete : Physical origins and practical measurements. *Nucl. Eng. des.* 203, 143–158. [https://doi.org/10.1016/s0029-5493\(00\)00304-6](https://doi.org/10.1016/s0029-5493(00)00304-6).
- Adenot, F., (1992). Durabilité du béton: Caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment (thèse de doctorat). Orléans. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00133395>.
- Adenot, F., Buil, M., (1992). Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water. *CEM. Concr. Res.*, special double issue proceedings of symposium d of the e-mrs fall meeting 1991 22, 489–496. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90092-a](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90092-a).
- Ahmed, I., Karim, E., Hadj, K.E., (2010). Étude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales 10. "siczs_2010" symposium international sur la construction en zone sismique université hassiba benbouali de chlef (Algérie).
- Aïtcin, P.-C., Neville, A., Acker, P., (1998). Les différents types de retrait du béton 11. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* - 215 - Mai-Juin 1998 - réf. 4184 - pp. 41-51.
- Aïtcin, P.C., (2003). The durability characteristics of high performance concrete : A review. *cem. concr. compos.*, concrete durability 25, 409–420. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00081-1).
- Al-ameeri, A., (2012). Using different types of fine aggregate to produce high strength concrete. *international journal of arts & sciences*, cd-rom. issn : 1944-6934 : 5(7) :187–196.
- Amba, J.C., (2008). Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de mortier et influence sur la fissuration: expérimentation et modélisation (Ph.d). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier. Disponible sur : <http://thesesups.ups-tlse.fr/2182/1/2008tou30267>.
- ASTM C 124: (1971) | Method of test for flow of portland-cement concrete by use of the flow table (withdrawn 1973) | sai global. Disponible sur : <https://www.astm.org/standards/c124.htm>.
- Aubry, M., MP, A., (1975). Recherches sur la nannopetrographie des roches siliceuses. *Rech. sur nannopetrographie roches siliceuses bull. trim. soc. geo. normandie amis mus. havre ; fr.*; vol. 62, num. 0002, p. 7 a 34.
- Augris, C., Cressard, A., (1984). Les granulats marins. Consulté le : nov. 23, 2019. [En ligne]. Disponible sur : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/4940/>.
- Badogiannis, E., Kakali, G., Dimopoulou, G., Chaniotakis, E., Tsivilis, S., (2005). Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor greek kaolins. *cem. concr. compos.*, cement and concrete research in greece 27, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.007>.

- Bajja, Z., (2016). Influence de la microstructure sur le transport diffusif des pâtes, mortiers et bétons à base de cem i avec ajout de fumée de silice (phdthesis). Université paris-saclay. phys. rev. 47, 777-780.
- Bala, M., Zentar, R., Boustingorry, P., (2018). Étude d'impact de la forme des granulats sur les paramètres du modèle d'empilement compressible, in : 36^{èmes} rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC. Saint-Etienne, France.
- Ball, E., Bard, J.P., Soba, D., (1984). Tectonique tangentielle dans la catazone pan-africaine du Cameroun : Les gneiss de Yaoundé. *J. Afr. Earth Sci.* 1983 2, 91–95. [https://doi.org/10.1016/s0731-7247\(84\)80002-6](https://doi.org/10.1016/s0731-7247(84)80002-6).
- Barkat, M., (2012). Effets des additions minérales et adjuvants fluidifiants sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons frais et durcis à base de sables des carrières (masters). Université Mohamed Khider - Biskra. Disponible sur : <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/2295>.
- Baroghel-Bouny, V., (2007). Water vapeur sorption experiments on hardened cementitious materials. Parts II : Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *CEM. Concr. Res., cementitious materials as model porous media : Nanostructure and transport promesses* 37, 438–454. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.017>.
- Baroghel-Bouny, Véronique, (1994). Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances (phdthesis). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Disponible sur : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00523299>.
- Baroghel-Bouny, V., (1994). Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - methodes, analyse, interprétations. Disponible sur : <http://worldcat.org/isbn/2720850301>.
- Baroghel-Bouny, V., Arnaud, S., Henry, D., Caracasses, M., Quenard, D., (2002). Vieillissement des bétons en milieu naturel : Une expérimentation pour le XXI^e siècle. III - propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire. *Bull. Lab. Ponts Chaussées*.
- Baroghel-Bouny, V., Larrard, F. De, (2000). In place durability assessment for the next millennium-long-term study. *Spec. Publ.* 192, 319–338. <https://doi.org/10.14359/5757>.
- Baron, J., Lesage, R., (1969). compacité et maniabilité des bétons hydrauliques, rapport de recherche. laboratoire central des ponts et chaussées, paris. Publié au LCPC, 58 boulevard lefevre -75732 paris cedex 15, sous le numéro 502 471 dépôt légal : 4^e trimestre 19 76.
- Bederina, M., Makhloufi, Z., Bounoua, A., Bouziani, T., Quéneudec, M., (2013). Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions. *Constr. Build. Mater.* 47, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.037>.
- Belaidi, A.S.E., Kenai, S., Kadri, E.-H., Soualhi, H., Benchaâ, B., (2016). effects of experimental ternary cements on fresh and hardened properties of self-compacting concretes. *J. Adhes. Sci. Technol.* 30, 247–261. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1099864>.
- Belaribi, O., (2015). Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzoloane (these de doctorat). cergy-pontoise. <https://www.theses.fr/2015cerg0787>.
- Benabed, B., Kadri, E.-H., Azzouz, L., Kenai, S., (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cem. Concr. Compos.* 34, 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>.

- Berredjem, L., Arabi, N., Molez, L., (2020). Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Constr. Build. Mater.* 246, 118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
- Berthollet, A., (2003). Contribution à la modélisation du béton vis-à-vis du vieillissement et de la durabilité: Interaction des déformations de fluage et du comportement non-linéaire du matériau (thesis). <http://www.theses.fr.lyon,insa>.
- Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Quadrio Curzio, A., Collepari, M., (2004). Mswi ashes as mineral additions in concrete. *Cem. Concr. Res.* 34, 1899–1906. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.001>
- Bessoles, B., Lasserre, M., (1977). Le complexe de base du cameroun. *Bull. Société géologique fr.* s7-xix, 1085–1092. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.s7-xix.5.1085>.
- Bikoko, T.G., Katte, V.Y., Bawe, G.N., Dongmene, M.F., Okonta, F.N., Tchamba, J.C., (2019). characterisation of light weight concrete impregnated with cement and charcoal. *Acad. J. Civ. Eng.* 37, 229–237. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.33>.
- Bouhamou, N., Belas, N., Mesbah, H., Jauberthie, R., Ouali, A., Mebrouki, A., (2009). Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens. *can. j. civ. eng.* 36, 1195–1206. <https://doi.org/10.1139/109-071>.
- Brown, P.W., (1981). An evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment. *Cem. Concr. Res.* 11, 719–727. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90030-2).
- Buil, M., Paillère, A.M., Roussel, B., (1984). High strength mortars containing condensed silica fume. *cem. concr. res.* 14, 693–704. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90033-4).
- Cabrera, O.A., Traversa, L.P., Ortega, N.F., (2010). Fluidéz de morteros cementíceos con arenas machacadas. *mater. constr.* 60, 115–130. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.50909>.
- Carter, N.L., Hansen, F.D., (1983). Creep of rocksalt. *Tectonophysics* 92, 275–333. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90200-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90200-7).
- Chabane1, A., Houari2, H., (2008). Influence du type de granulats sur le fluage du béton. *sci. technol. b sci. ing.* 7–15. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167606>.
- Chanvillard, G., D'aloia, L., (1994). Prevision de la resistance en compression au jeune âge du béton - application de la methode du temps equivalent. *bull. liaison lab. ponts chaussees.* <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00350480>.
- Chaussadent, T., (1999). État des lieux et reflexions sur la carbonatation du beton arme. *Études rech. lab. ponts chaussees - ser. ouvrages art.* url : <http://worldcat.org/isbn/2720826707>
- Collection Technique CIMbéton (2005). Les constituants des bétons et des mortiers. tome 1. centre d'information sur le ciment et ses applications (france). cimbéton, 2005, p.32-49. url <https://www.infociments.fr/cimbeton> (accessed 6.24.20).
- Coussot, P., (2005). Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials: Applications in Industry and Environment. John Wiley & Sons.
- Damidot, D., Glasser, F.P., (1995). Investigation of the cao-al₂o₃-sio₂-h₂o system at 25 °c by thermodynamic calculations. *Cem. Concr. Res.* 25, 22–28. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00108-b](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00108-b).

- Dang, J., Zhao, J., (2019). Influence of waste clay bricks as fine aggregate on the mechanical and microstructural properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 228, 116757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116757>.
- De Larrard F., SEDRAN T., BROCHU F., LEDEE V, (2004). -Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses.-Paris : LCPC, -13 p.
- De Larrard, F. "Concrete Mixture-Proportioning, (1999). -A Scientific Approach", Modern Concrete Technology Series, No. 9, E & FN SPON, Londres,
- De Larrard F., (2000) -Structures Granulaires et Formulation Des Bétons, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 414 p.
- Debut, R., (1978). Morphologie et granulométrie des granulats. *atemcop*, vol. 11, no 85, consulté le: nov. 23, 2019. [En ligne]. Disponible sur : <https://trid.trb.org/view/1055925>.
- Demange, M., (2011). Les textures des roches cristallines : aspects microscopiques. Presses des Mines.
- DIN EN ISO 12677 (2013). Url <https://www.boutique.afnor.org/norme/din-en-iso-12677/analyse-chimique-des-materiaux-refractaires-par-fluorescence-de-rayons-x-methode-de-la-perle-fondue-iso-126772011-version-allema/article/808149/eu122121> (accessed 5.25.20).
- Divet, L., (2000). Etat des connaissances sur les causes possibles des réactions sulfatiques internes au béton. bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 227 - juillet-août 2000 - réf. 4323 - pp. 71-84.
- Dos Santos, W.N., (2003). Effect of moisture and porosity on the thermal properties of a conventional refractory concrete. *j. eur. ceram. soc.* 23, 745-755. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(02\)00158-9](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(02)00158-9).
- Dupont, P., Aussedat, G., Descantes, Y., Guedon, J.-S., (2007). Granulats, origines et caractéristiques réf tip253web - superstructures bâtim. url <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/granulats-origines-et-caracteristiques-c902/> (accessed 6.23.20).
- Dreux G. , (1970). - Guide pratique du béton, Collection de l'ITBT,
- Dreux, G. et Festa, J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, Paris, France. ISBN-13 : 978-2212102314. 1, 3, 4, 6, 7
- Mater. J. (2006). Effect of high levels of fines content on concrete properties. *aci* 103. <https://doi.org/10.14359/18226>.
- Ekengoue, C., (2018). Influence de l'exploitation artisanale du sable sur la santé et la sécurité des artisans et l'environnement : cas de la carrière de nkol'ossananga, région du centre cameroun. *Eur. Sci. J.* 14. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p246>.
- Akinboboye F. Et Al., (2015). Comparison of the compressive strength of concrete produced using sand from different sources. *Int. J. Acad. Res. Bus. Soc. Sci.* 5, pages 1-12. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v5-i8/1791>.
- Fasseu, P., (1997). Alkali-réaction du béton - essai d'expansion résiduelle sur béton durci - projet de methode d'essai lpc no 44. Tech. Methodes lab. ponts chaussees - methode.
- Ferhati, T., (2016). Durabilité d'un béton exposé à un milieu agressive (acide sulfurique) influence du rapport g/s (thesis). Université mohamed boudiaf - m'sila.
- Gollop, R.S., Taylor, H.F.W., (1995). Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack iii. Sulfate-resisting portland cement : réactions with sodium and magnesium sulfate solutions. *cem. concr. res.* 25, 1581-1590. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00151-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00151-2)

- Gonçalves, J.P., Tavares, L.M., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E.M.R., Cunha, E.R., (2007). Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cem. Concr. Res.* 37, 924–932. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.009>
- Gonzalez, J.A., Algaba, J.S., Andrade, C., (1980). Corrosion of reinforcing bars in carbonated concrete. *br. corros. j.* 15, 135–139. <https://doi.org/10.1179/bcj.1980.15.3.135>
- Granulats du Cameroun | Gracam S.A - tout venant 0/31.5 url <http://granulatsducameroun.com/> (accessed 5.8.20).
- Guenanou, F., Khelafi, H., Aattache, A., (2019). Behavior of perlite-based mortars on physicochemical characteristics, mechanical and carbonation: case of perlite of hammam boughrara. *j. build. eng.* 24, 100734. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100734>
- Guenot-Delahaie, I., (1997). Contribution to physical analysis and modelling of concrete basic creep.
- Guillon, e., (2004). Durabilité des matériaux cimentaires : Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles (phdthesis). École Normale Supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- H, R., A.A, R., (2008). Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes 9, 303–319.
- Hafid, H., (2012). Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles (thesis). <http://www.theses.fr>. Paris est.
- Hafid, H., (2019). Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles 161.
- Hewlett, P., (2003). *Lea's chemistry of cement and concrete*. elsevier.
- Hostomsky, J., Jones, A.G., (1991). Calcium carbonate crystallization, agglomeration and form during continuous precipitation from solution. *J. Phys. Appl. Phys.* 24, 165–170. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/2/012>
- Imamoto, K., Arai, M., (2008). Specific surface area of aggregate and its relation to concrete drying shrinkage. *Mater. struct.* 41, 323–333. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9245-x>
- Jeanrot, P., Remond, G., (1978). Application de la microscopie électronique à la minéralogie. ii. microscopie électronique à balayage et microanalyse associée par spectrométrie de rayons x dispersive d'énergie. *bull. minéralogie* 101, 287–304. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1978.7191>
- Joudi-Bahri, I., (2012). Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien (phdthesis). Université de lorraine.
- Joudi-Bahri, I., Lecomte, A., Ouezdou, M.B., Achour, T., (2012). Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *CEM. Concr. Compos.* 34, 771–780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.010>
- Kala, D.T.F., (2013). Effect of granite powder on strength properties of concrete 15.
- K. J. Dong, R. Y. Yang, R. P. Zou, et A. B. Yu, (2006), « Role of Interparticle Forces in the Formation of Random Loose Packing », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no 14, p. 145505. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.145505.
- Ke, Y., (2008). Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : Expérience et modélisation (thesis). <http://www.theses.fr>. Cergy-Pontoise.

- Kearsley, E.P., Wainwright, P.J., (2002). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *cem. concr. res.* 32, 233–239. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00665-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00665-2).
- Kenai, S., Debieb, F., (2011). Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés. *Mater. struct.* 44, 815–824. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9668-7>.
- Khouadjia, M., Mezghiche, B., Drissi, M., (2015). Experimental evaluation of workability and compressive strength of concrete with several local sand and mineral additions. *constr. build. Mater.* 98, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.081>.
- Khouadjia, M.L.K., (2016). Etude des propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières : Expérimentation et Modélisation (PhD). Université mohamed khider - biskra.
- Koffi, K., Aubertin, M., Hernandez, M.A., Ouangrawa, M., Chapuis, R., Bussiere, B., (2010). Etude de la conductivité hydraulique des mélanges à granulométrie étalée 7. DOI <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0397-X>.
- Kollek, J.J., (1989). The determination of the permeability of concrete to oxygen by the cembureau method—a recommendation. *Mater. struct.* 22, 225–230. <https://doi.org/10.1007/bf02472192>.
- Kou, S.-C., Poon, C.-S., (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *constr. build. Mater.* 23, 2877–2886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.009>.
- Krieger, I.M., Dougherty, T.J., (1959). A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. *Transactions of the Society of Rheology* 3, 137–152.
- L. Martinie, P. Rossi, et N. Roussel, (2010) « Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction », *Cement and concrete research*, vol. 40, no 2, p. 226-234.
- La Durabilité Des Bétons, (1992). Collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, paris.
- Laneyrie, C., Beaucour, A.-L., Noumowe, A., Ledesert, B., Hebert, R.L., (2014). Évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés: mesures de masses volumiques et cinétiques d'absorption d'eau 11.
- Larbi, B.M., Madani, B., (2014). Les performances mécaniques et thermiques d'un béton léger à base de déchets industriels solides et de granulats de bois. *matec web conf.* 11, 01040. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141101040>
- Le microscope polarisant. Laboroches. Url <https://laboroches.weebly.com/le-microscope-polarisant.html> (accessed 6.10.20).
- L'extraction du sable. franceforumpourtous.forumactif.org. Url <https://franceforumpourtous.forumactif.org/t7810-l-extraction-du-sable> (accessed 6.26.20).
- Limbachiya, M.C., Kew, H.Y., (2008). Excellence in concrete construction through innovation : proceedings of the conference held at the kingston university, united kingdom, 9 - 10 september 2008. crc press.
- Loo, Y.H., Chin, M.S., Tam, C.T., Ong, K.C.G., (1994). A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete. *Mag. Concr. Res.* 46, 191–200. <https://doi.org/10.1680/mac.1994.46.168.191>
- Luc Leroy, M.N., Guy Molay, T.G., Ndjaka Jean, N.J., Bienvenu, M., (2017). Analysis of strength hydraulic concrete produced with a mixture of crushed gneiss and alluvial sand. *j. appl. mech. eng.* 6. <https://doi.org/10.4172/2168-9873.1000289>

- Macie, C., Manhique, A., Manjate, R., Madivate, C., (2016). Effect of the mineralogical composition of limestone on the properties of mortars. *J. Mater. Sci. Chem. Eng.* 4, 16–24. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.45003>
- Mackenzie, A.S., Brassell, S.C., Eglinton, G., Maxwell, J.R., (1982). Chemical fossils: the geological fate of steroids. *Science* 217, 491–504. <https://doi.org/10.1126/science.217.4559.491>
- Mahaut, F., Mokéddem, S., Chateau, X., Roussel, N., Ovarlez, G., (2008). Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 38, 1276–1285. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.001>
- Makani, A., (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00624785>.
- Marouf, M., (2019). Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton. Url <http://hdl.handle.net/123456789/8876>.
- Matchebou A, (2009) Impact du parc automobile sur la congestion du trafic et la pollution de l'air dans la ville de Yaoundé Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents, Ghardaïa, Algérie, 16-18 fév. 2009. Actes, ENP ed., Alger, p. 245-252
- Melais, F.Z., Achoura, D., (2011). Formulation et propriétés des bétons de sable renforcé de fibres de polypropylène.
- Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., Aït-Mokhtar, A., (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *constr. build. Mater.* 23, 625–633.
- Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., Aït-Mokhtar, A., (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *constr. build. Mater.* 23, 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.005>
- Methode de Dreux Gorisse, (1995). Scribd. url <https://fr.scribd.com/doc/100307449/methode-de-dreux-gorisse> (accessed 2.4.20).
- Miragliotta, R., (2000). Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués : Prise en compte des effets de paroi (These de doctorat). La Rochelle.
- Monteiro, P.J.M., Kurtis, K.E., (2003). Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack. *cem. concr. res.* 33, 987–993. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01097-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01097-9).
- Nanda, R.P., Das, A.K., Moharana, N., (2010). Stone crusher dust as a fine aggregate in concrete for paving blocks. url <https://www.semanticscholar.org/paper/stone-crusher-dust-as-a-fine-aggregate-in-concrete-nanda-das/9092e7f699e1c823d3fedfca79d5c86d79d5c7bd> (accessed 5.4.20).
- Neville, A.M., (1995). Properties of concrete. Longman London (livre).
- NF EN 196-2 - avril 2006. url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-196-2/methodes-d-essais-des-ciments-partie-2-analyse-chimique-des-ciments/article/686585/fa112155> (accessed 6.4.20).
- NF EN 933-1 - Décembre 1997. url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-933-1/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-geometriques-des-granulats-partie-1-determination-de-la-granularite-analyse-granulom/article/722188/fa027452> (accessed 5.25.20).
- NF EN 1097-6 - Juin 2001. url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-1097-6/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-des-granulats-partie-6-determination-de-la-masse-volumique-r/article/765015/fa045290> (accessed 5.25.20).

- NF EN 12390-3 - Juin 2019. url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-12390-3/essais-pour-beton-durci-partie-3-resistance-a-la-compression-des-eprouvettes/article/904939/fa190566> (accessed 3.31.20).
- NF EN 413-2. Url <https://norminfo.afnor.org/consultation/65348> (accessed 5.23.20).
- NF EN 15305 : 2009 | non-destructive testing - test method for residual stress analysis by x-ray diffraction | sai global. url https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/nf-en-15305-2009-50085_saig_afnor_afnor_108850/ (accessed 5.25.20).
- NF P 18-598 (1991). Granulats-equivalent de sable, norme francaise. - references - scientific research publishing. url <https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2260866> (accessed 3.27.20).
- NF P18-459. Url <https://norminfo.afnor.org/consultation/nf-p18-459/beton-essai-pour-beton-durci-essai-de-porosite-et-de-masse-volumique/38429> (accessed 3.27.20).
- NF P18-304 - Décembre (1973). url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p18-304/granulometrie-des-granulats/article/888618/fa006723> (accessed 5.2.20).
- NF P18-451 - december (2018). url <https://www.boutique.afnor.org/standard/nf-p18-451/concrete-execution-of-concrete-structures-specific-rules-for-uhprfc/article/913584/fa192076> (accessed 4.16.20).
- NF P18-545 - septembre (2011). url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p18-545/granulats-elements-de-definition-conformite-et-codification/article/729224/fa164857> (accessed 10.25.20).
- NF P18-554 - décembre (1979). Url <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p18-554/granulats-mesures-des-masses-volumiques-porosite-coefficient-d-absorption-et-teneur-en-eau-des-granulats-d-superieur-ou-egal-a-4/article/891110/fa013948> (accessed 5.25.20).
- NF P18 406: 1981 | concretes - compression test | sai global. url https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/nfp-18-406-1981-57392_saig_afnor_afnor_123464/ (accessed 4.6.20).
- Ngoupayou, J.R.N., Kpoumie, A., Boeglin, J.-L., Lienou, G., Nfocgo, A.K., Ekodeck, G.E., (2007). Transports solides et érosion mécanique dans un écosystème tropical d’Afrique : Exemple du bassin versant de la sanaga au Sud - Cameroun 7.
- Nguyen, V.H., Nedjar, B., Colina, H., Torrenti, J.M., (2006). A separation of scales homogenization analysis for the modelling of calcium leaching in concrete. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, computational modelling of concrete 195, 7196–7210. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.02.036>
- Niry Razafinjato, R., (2015). Comportement à haute température des granulats naturels siliceux et calcaires et leur influence sur celui du béton., in : *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Bayonne, France.
- Nzenti, J.P., (1998). Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the pan-african north equatorial fold belt (Yaounde, Cameroon): Biotitites and magnetite rich pyroxenites. *J. Afr. Earth Sci.*, Aspects of tensional magmatism 26, 37–47. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(97\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00135-8).
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudiere, J., Soba, D., (1988). Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Res.* 38, 91–109. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90086-1](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90086-1).
- Ovarlez, G., (2011). Rhéologie des pâtes granulaires (thesis). Université Paris-Est.
- P18-573 - Décembre (1990). URL <https://www.boutique.afnor.org/norme/p18-573/granulats-essai-de-los-angeles/article/861908/fa021245> (accessed 5.26.20).

- Pane, I., Hansen, W., (2002). Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions. *mater. j.* 99, 534–542. <https://doi.org/10.14359/12362>.
- PC Aitcin, A Neville, P Acker – (1998) ; Bulletin-Laboratoires des ponts et chaussees, - ifsttar.fr.
- Pertué, A., Mounanga, P., Khelidj, A., (2018). Influence de la température et du rapport Eau/Ciment sur le retrait empêché des pâtes de ciment au jeune âge 9.
- Perrot, T. Lecompte, H. Khelifi, C. Brumaud, J. Hot, et N. Roussel, (2012) « Yield stress and bleeding of fresh cement pastes », *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no 7, p. 937-944. doi: 10.1016/j.cemconres.2012.03.015.
- Piasta, W., Góra, J., Budzyński, W., (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. *Constr. Build. Mater.* 153, 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.167>.
- Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L., (2002). Pore size distribution of high performance metakaolin concrete. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater Sci ed* 17, 42–46. <https://doi.org/10.1007/bf02852633>.
- Powers, T.C., 1968. The thermodynamics of volume change and creep. *Mater. Constr.* 1, 487–507. <https://doi.org/10.1007/bf02473638>.
- Rabehi, M., Mezghiche, B., Guettala, S., (2013). Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. *Constr. Build. Mater.* 45, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.074>
- Razel-Bec - Filiale Travaux Publics du groupe Fayat. URL <http://www.razel-bec.com/fr/navigationhaut/metiers-razel-bec/materiaux-carrieres/carrieres-de-chantier> (accessed 6.19.20a).
- Rheological, mechanical and structural performances of crushed limestone sand concrete, 2010. . *int. j. concr. struct. mater.* 4, 97–104. <https://doi.org/10.4334/ijcsm.2010.4.2.97>.
- Rmili, A., Oueddou, M.B., Added, M., Ghorbel, E., (2009). Incorporation of crushed sands and tunisian desert sands in the composition of self compacting concretes part i: Study of formulation. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 3, 3–9. <https://doi.org/10.4334/ijcsm.2009.3.1.003>.
- Roches, C. Français de Mécanique des, (2000). Manuel de mécanique des roches. Presses des Mines.
- Roesler, J., Gaedicke, C., Lange, D., Villa-Lobos, S., Rodden, R., Grasley, Z., (2012). Mechanical properties of concrete pavement mixtures with larger size coarse aggregate 516–527. [https://doi.org/10.1061/40838\(191\)44](https://doi.org/10.1061/40838(191)44).
- Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R., (2001). Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cem. Concr. Res.* 31, 1809–1813. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00548-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00548-8).
- Rozière, E., (2007). Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle (These de doctorat). Nantes. URL <https://nantilus.univ-nantes.fr/vufind/Record/PPN123713064>.
- Sabbagh, J., (2002). Dynamic and static moduli of elasticity of resin-based materials. *dent. mater.* 18, 64–71. [https://doi.org/10.1016/s0109-5641\(01\)00021-5](https://doi.org/10.1016/s0109-5641(01)00021-5).
- Sadhouari, F., Goufi, N., Guezzouli, A., (2009). Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons, in : sbeidco : 1st international conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries.

- Sadok, A., Zentar, R., Abriak, N.E., (2015). Modélisation de la compacité granulaire par une approche d'apprentissage automatique, in: Rencontres Universitaires de Génie Civil. Bayonne, France.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., Olek, J., (2003). Mechanism of sulfate attack: A fresh look: part 2. proposed mechanisms. *cem. concr. res.* 33, 341–346. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00958-4](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00958-4)
- Scher, H., Zallen, R., (1970). Critical density in percolation processes. *J. Chem. Phys.* 53, 3759–3761. <https://doi.org/10.1063/1.1674565>.
- Scrivener, K.L., (2004). Backscattered electron imaging of cementitious microstructures : Understanding and quantification. *Cem. Concr. Compos.* 26, 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029>.
- Scrivener, K.L., Young, J.F., (1997). Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. *crc press*. <https://doi.org/10.1201/9781482294958>.
- Sedran T. (1999) - Rhéologie et rhéomètre des bétons, application aux bétons autonivelants.-Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Sedran, T., De Larrard, F., Angot, D., (1994). Prédiction de la compacité des melanges granulaires par le modele de suspension solide - II - validation, cas des melanges confines. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées*.
- Segalen, P., (1956). Les sols et ça géomorphologie du Cameroun 46. (Livre)
- Shah, V., Scrivener, K., Bhattacharjee, B., Bishnoi, S., (2018). Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. *Cem. Concr. Res.* 109, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.016>.
- Spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-OES/MS), analyse ICP url <https://www.eaglabs.fr/cm/icp-oes-ms.html> (accessed 11.1.20).
- Tamimi, A.K., (1997). High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions. *mater. struct.* 30, 188–191. <https://doi.org/10.1007/bf02486392>
- Taylor, H.F.W., (1997). Cement Chemistry. Thomas Telford. (Livre).
- Thiery, M., (2006). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. *etudes rech. lab. ponts chaussees - ser. ouvrages art.* URL: <http://worldcat.org/issn/1161028X>.
- Thiery, M., (2005). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques (These de doctorat). École nationale des ponts et chaussées (France).
- Touze, P., godart, b., (1997). Evaluation de la teneur en alcalins equivalents actifs dans les ciments. *tech. methodes lab. ponts chaussees methode essai*.
- Tslb, 2019. La norme béton nf en 206/cn. tout sur béton. url <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/norme-beton-nf-en-206-cn/> (accessed 5.3.20).
- Viallis-Terrisse, H., (2000). Interaction des silicates de calcium hydratés (c-s-h), principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles (thesis). <http://www.theses.fr>. Dijon.
- Vicat, J.-P., Mvondo, H., Willems, L., Pouclet, A., (2002). phénomènes karstiques fossiles et actuels au sein des formations métamorphiques silico-alumineuses de la nappe pan-africaine de yaoundé (sud-cameroun). *comptes rendus geosci.* 334, 545–550. [https://doi.org/10.1016/s1631-0713\(02\)01791-1](https://doi.org/10.1016/s1631-0713(02)01791-1).

- Villain, G., Thiery, M., Platret, G., (2007). measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *cem. concr. res.* 37, 1182–1192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015>.
- Voivret C. (2008) - Texture et comportement des matériaux granulaires à grande polydispersité. - Montpellier: Université Montpellier 2.
- Vu, N. Tru, (2011). Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabiliste (these de doctorat). Toulouse, INSA. http://eprint.insa-toulouse.fr/408/1/2011_VU.pdf.
- Vulliet, L., Laloui, L., Zhao, J., (2016). Mécanique des sols et des roches (TGC volume 18) : avec écoulements souterrains et transferts de chaleur. PPUR presses polytechniques.
- Wee, T.H., Suryavanshi, A.K., Wong, S.F., Rahman, A.K.M.A., 2000. sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures. *mater. j.* 97, 536–549. <https://doi.org/10.14359/9286>.
- Westerholm, M., Gram, H.-E., Lagerblad, B., (2008). crushed rock as sand in concrete: the swedish experience. presented at the 16th annual icar symposium. austin, usa. May 12 - 14, 2008. [En ligne]. Disponible sur : <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-80379>.
- Winslow, D.N., Diamond, S., (1970). A mercury porosimetry study of the porosity in portland cement. *j. mater.* Disponible sur : <https://trid.trb.org/view/96627>.
- Xing, Z., (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température (phdthesis). Université de Cergy Pontoise. URL [ttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00624785](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00624785)
- XP P18-545 - Mars (2008). URL <https://www.boutique.afnor.org/norme/xp-p18-545/granulats-elements-de-definition-conformite-et-codification/article/825481/fa158723> (accessed 5.25.20).
- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S., (2017). Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 84, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015>.
- Yang, S., Lee, H., (2017). Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications. *constr. Build. Mater.* 136, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.029>.
- Zaamouki, W., (2016). Durabilité de béton ordinaire a base sable de la dune broyée dans les milieux agressifs (Thesis). URL: <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1117>.
- Zeghichi, L., Benghazi, Z., Baali, L., (2014). The effect of the kind of sands and additions on the mechanical behaviour of S.C.C. *phys. procedia*, 8th international conference on Materials Sciences, CSM8-ISM5 55, 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.070>.
- Zhang, D., Li, K., (2019). Concrete gas permeability from different methods : Correlation analysis. *CEM. Concr. Compos.* 104, 103379. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103379>.
- Zhang, M., (2003). Links between school absenteeism and child poverty. *Pastor. care educ.* 21, 10–17. <https://doi.org/10.1111/1468-0122.00249>.
- Zoshchuk, N.I., Vladimirov, V.V., Kuznetsov, V.D., (1984). Influence de la forme des grains de sables sur les proprietes des betons. *Beton zhelezobet.* Disponible sur : <https://trid.trb.org/view/1035840>.

ANNEXES

➤ ANNEXE 1 : COURBES GRANULOMETRIQUES POUR COMPOSITIONS OPTIMALE DE BETONS

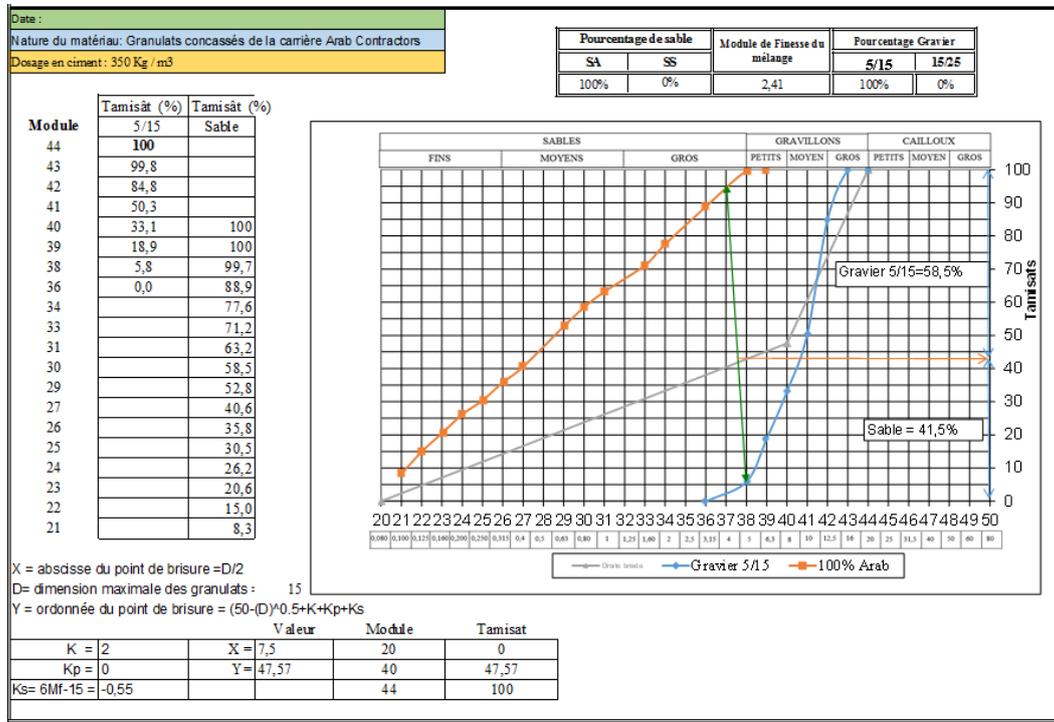


Figure Annexe 1 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 100% SA+0%SS

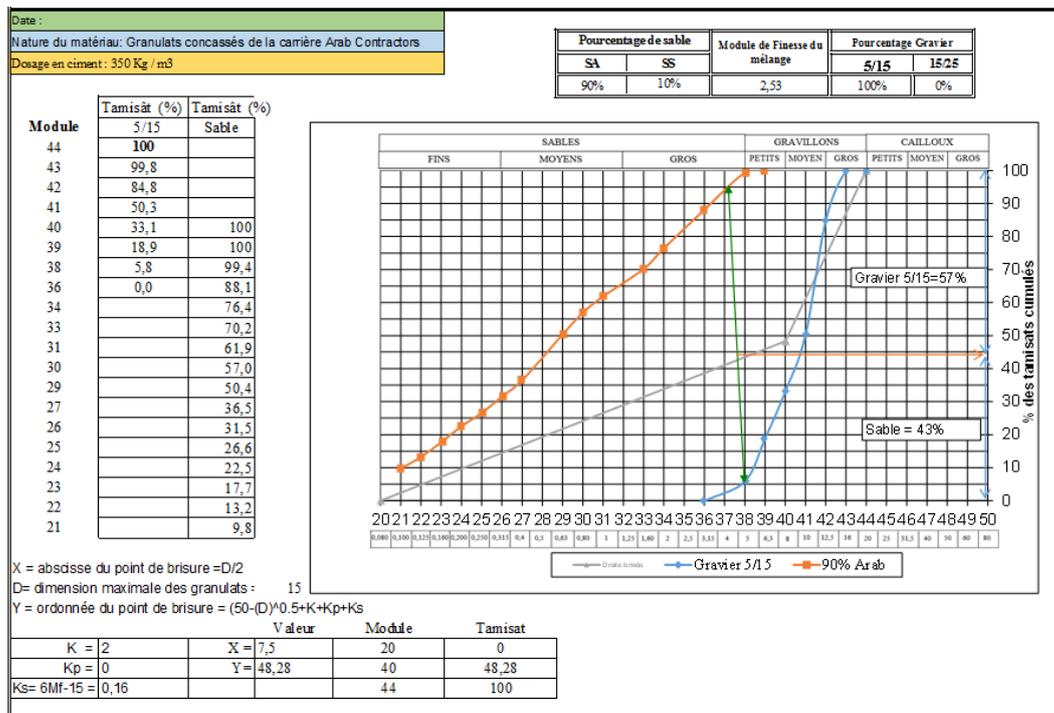


Figure Annexe 2 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 90% SA+10% SS

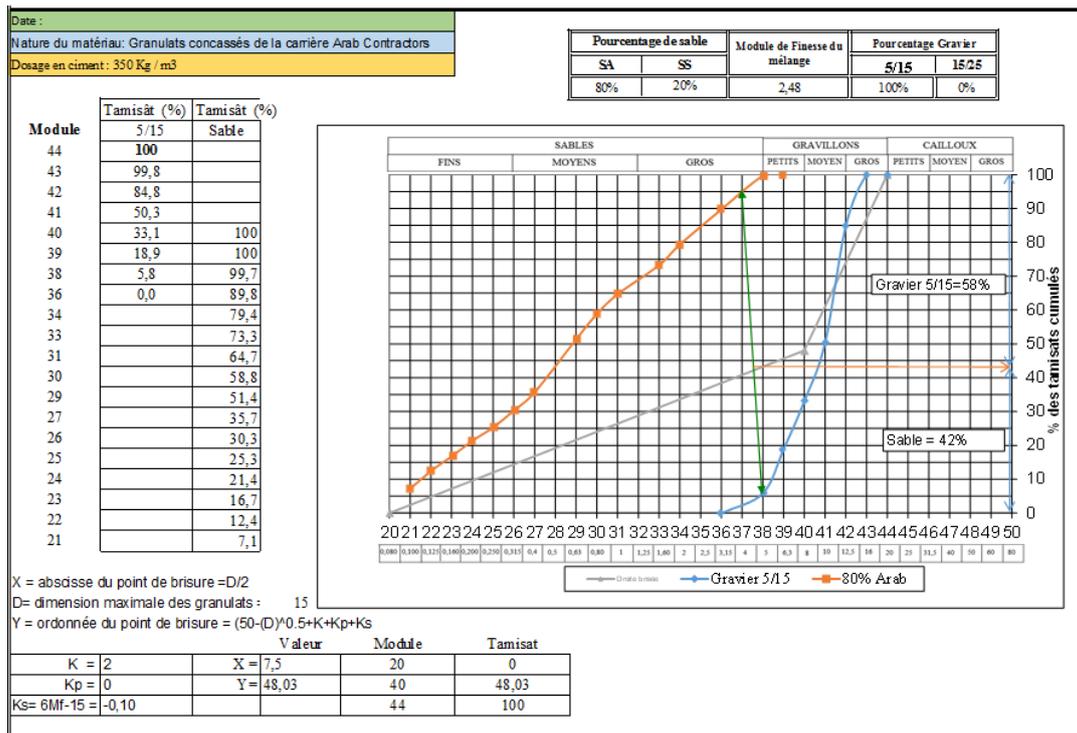


Figure Annexe 3 : Distribution granulaire pour composition de bétons de 80% SA +20% SS

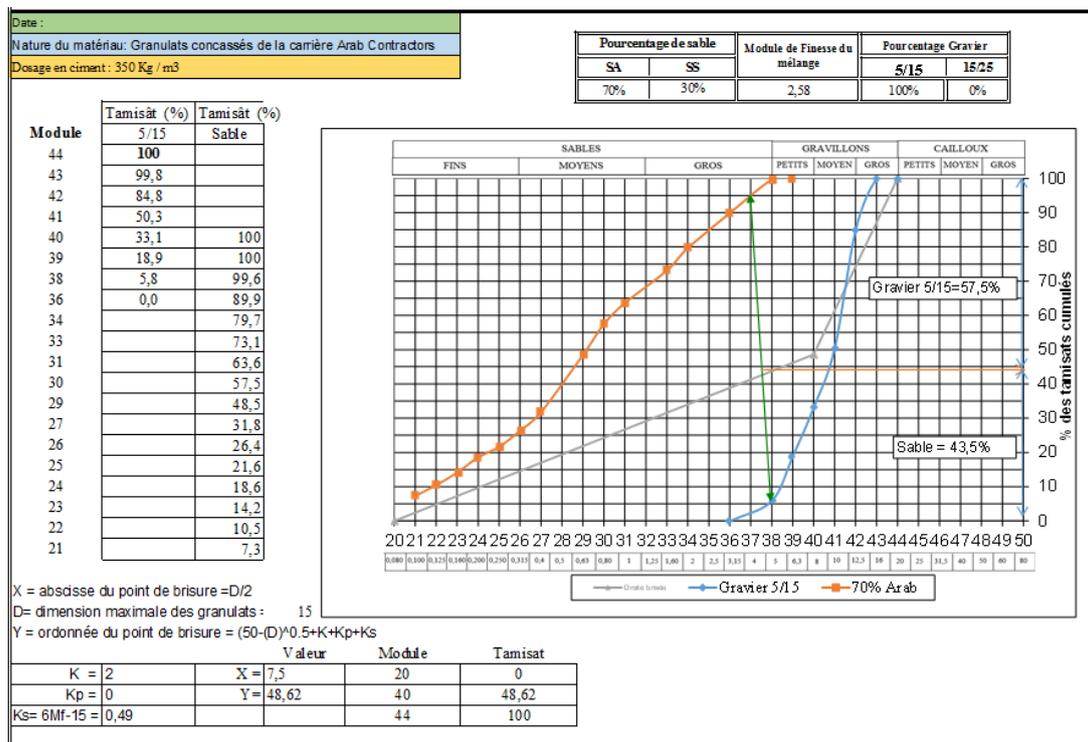


Figure Annexe 4: Distribution granulaire pour composition de bétons de 70% SA + 30% SS

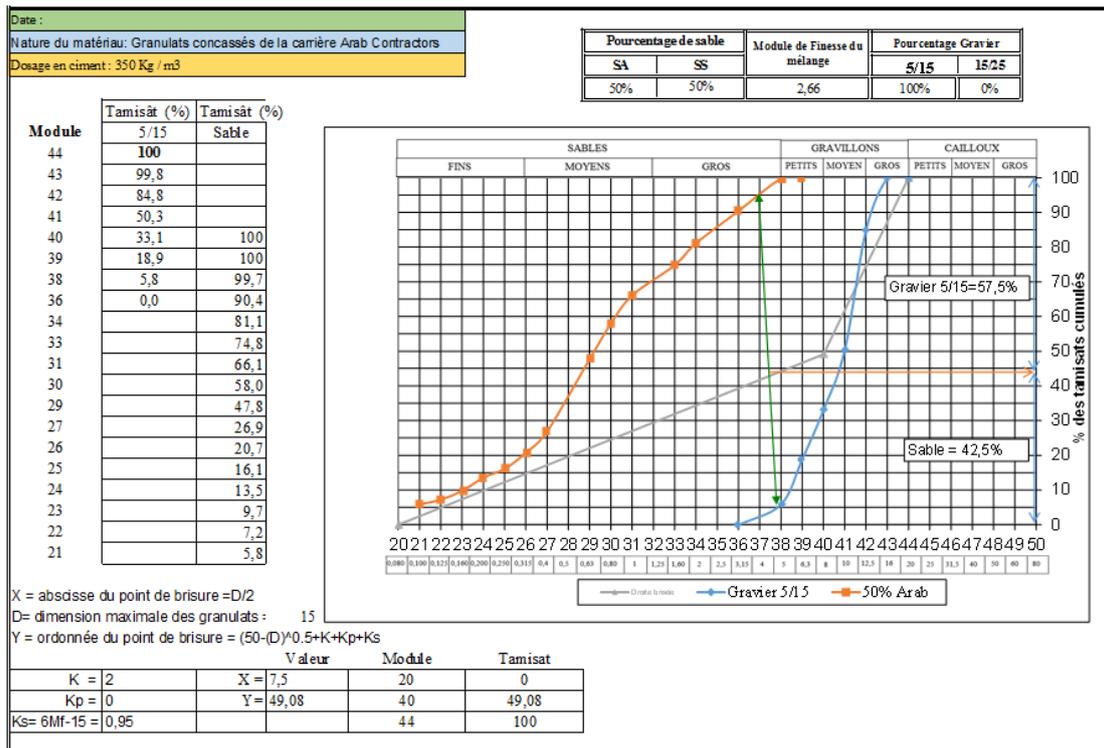


Figure Annexe 5: Distribution granulométrique pour composition de bétons de 50% SA + 50% SS

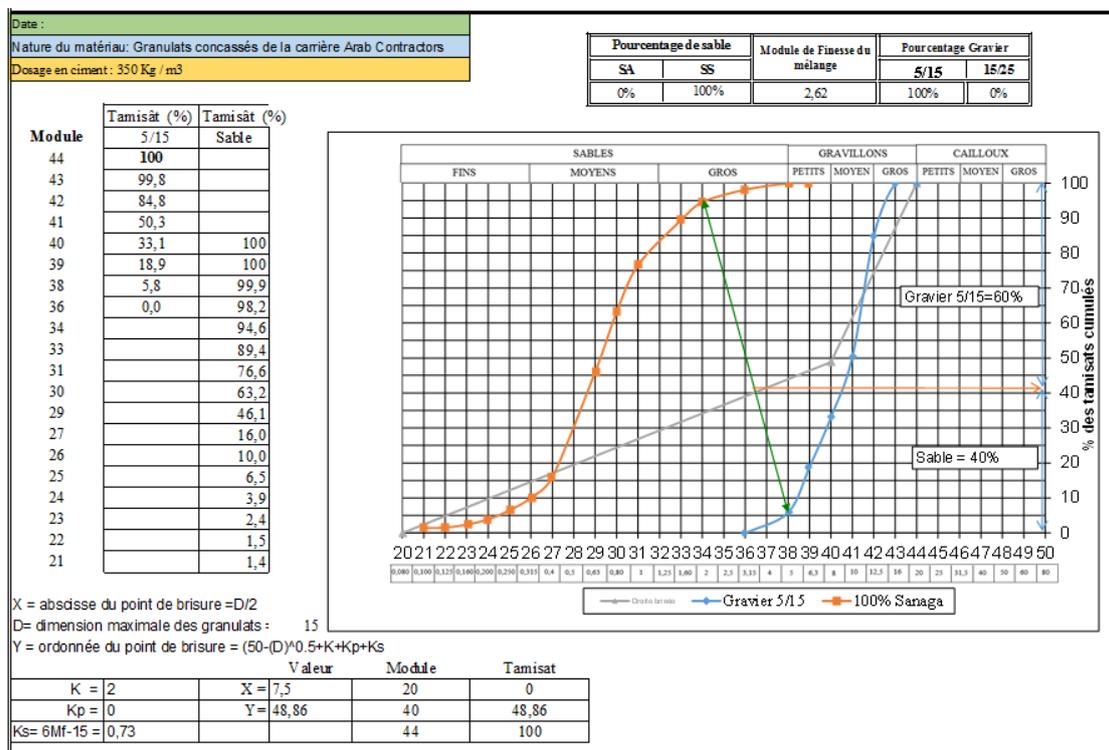


Figure Annexe 6: Distribution granulométrique pour composition de bétons de 0% SA + 100% SS

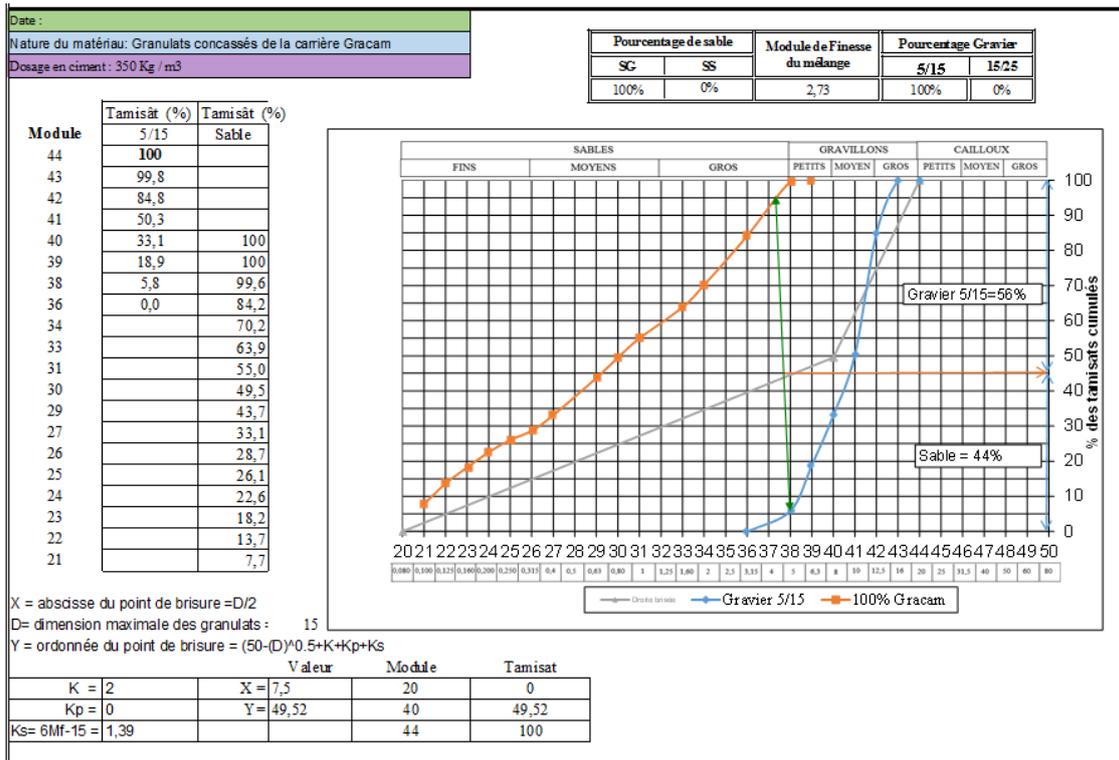


Figure Annexe 7 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 100% SG + 0% SS

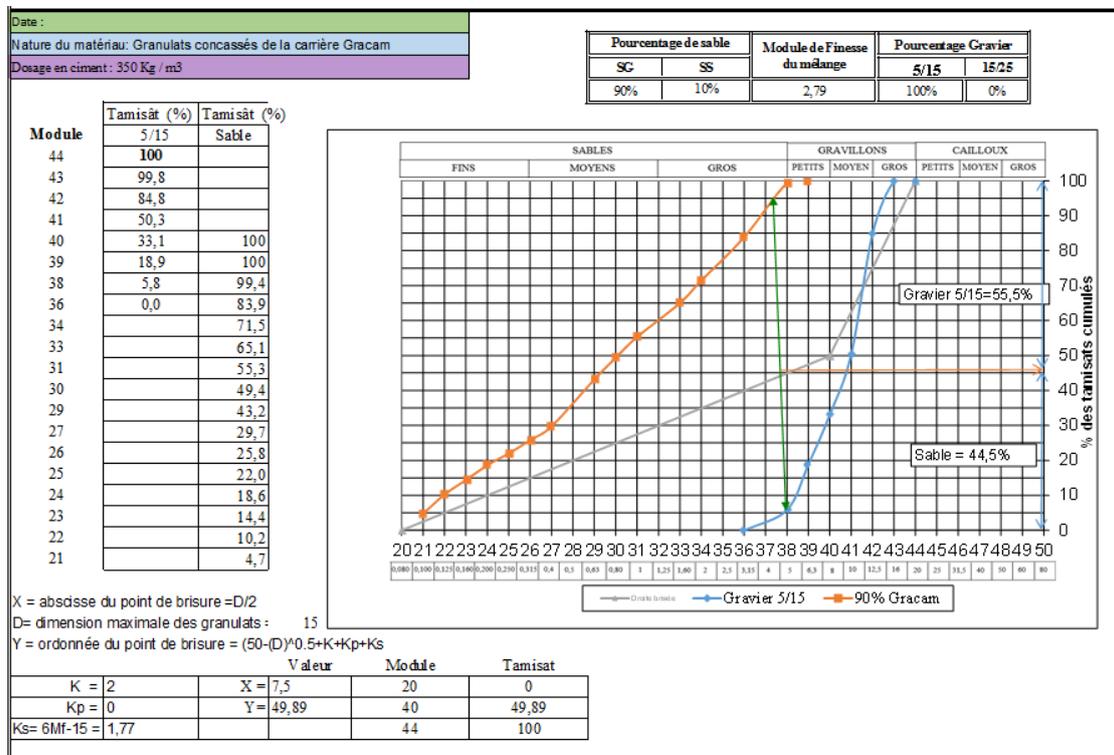


Figure Annexe 8 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 90% SG + 10% SS

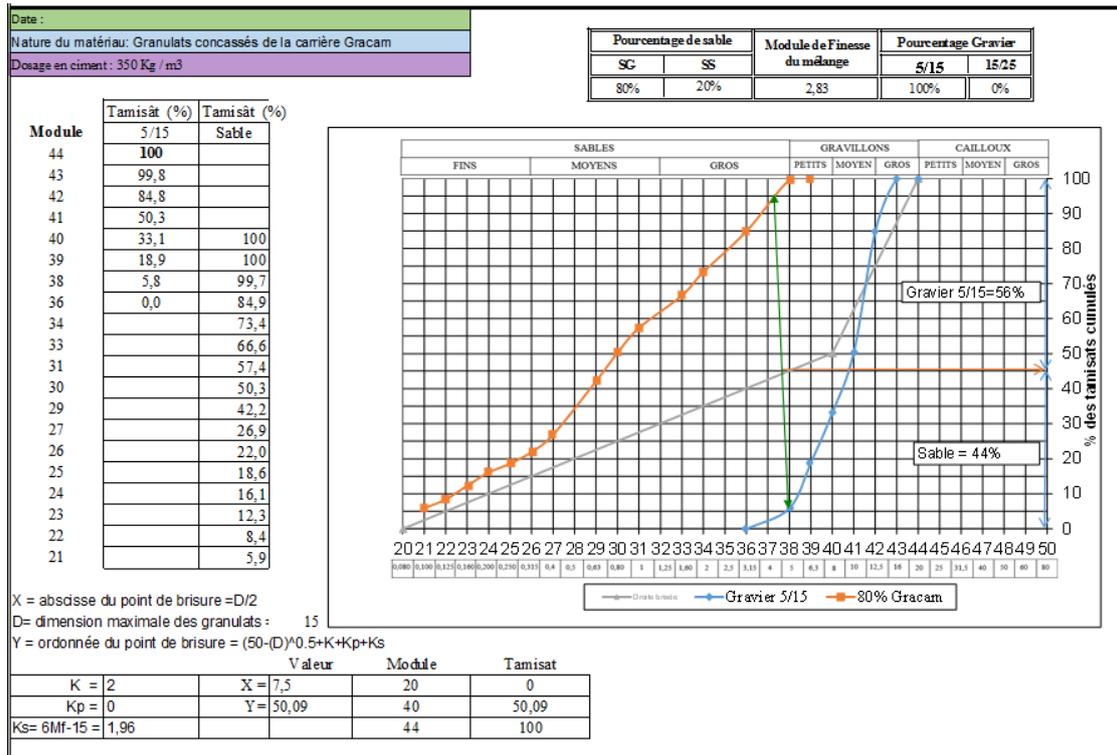


Figure Annexe 9: Distribution granulair pour composition de bétons de 80% SG + 20% SS

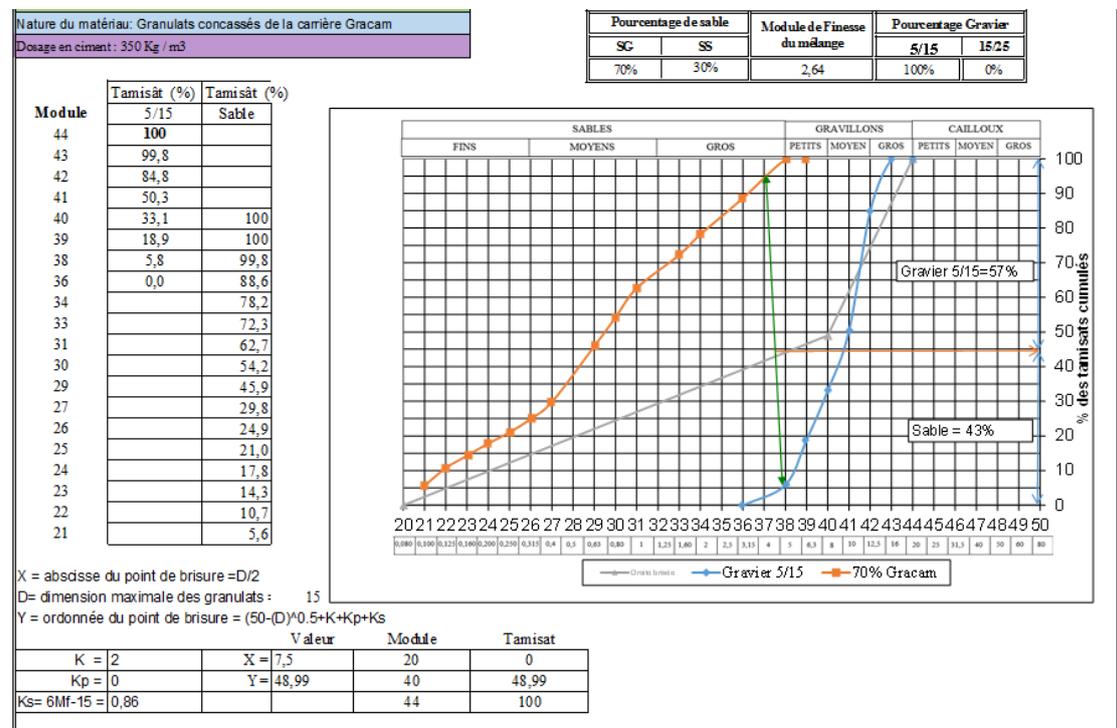


Figure Annexe 10: Distribution granulair pour composition de bétons de 70% SG + 30% SS

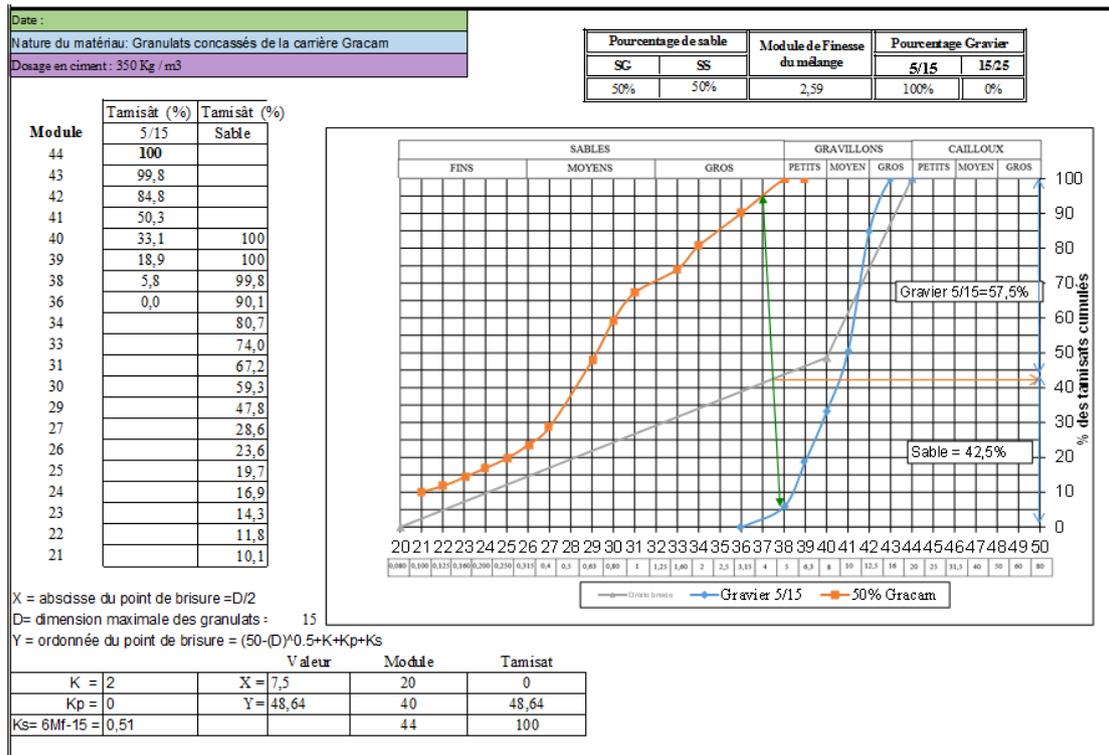


Figure Annexe 11 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 50% SG + 50% SS

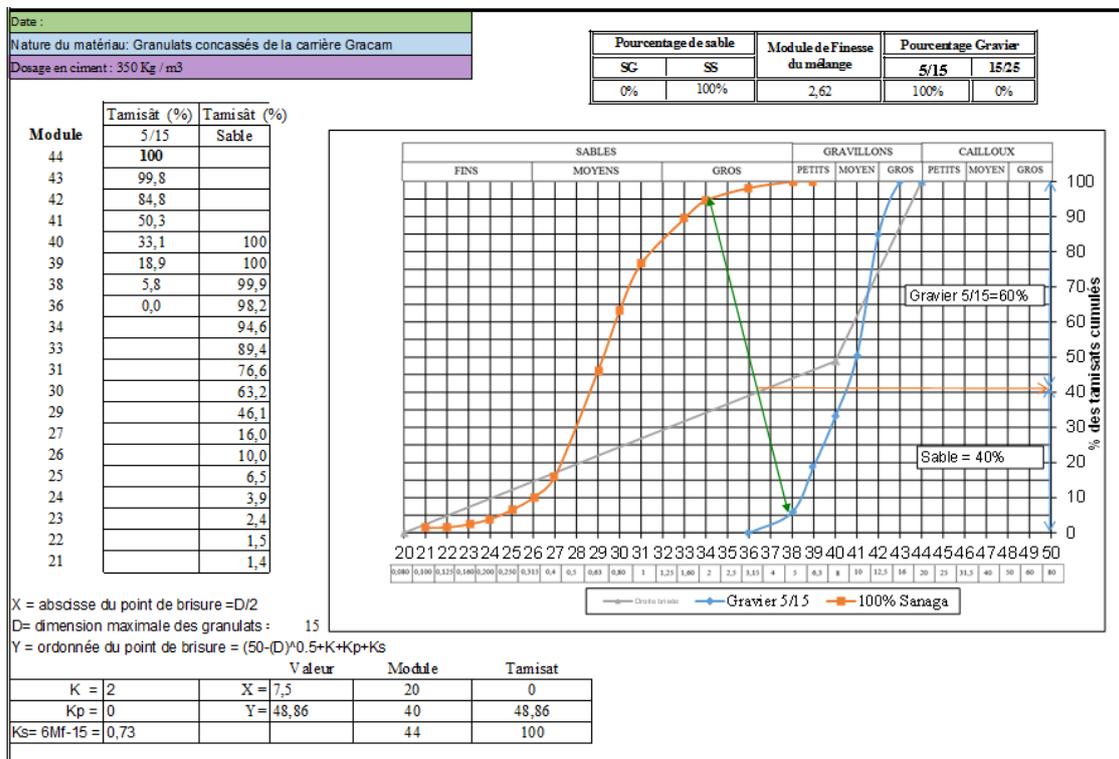


Figure Annexe 12 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 0% SG + 100% SS

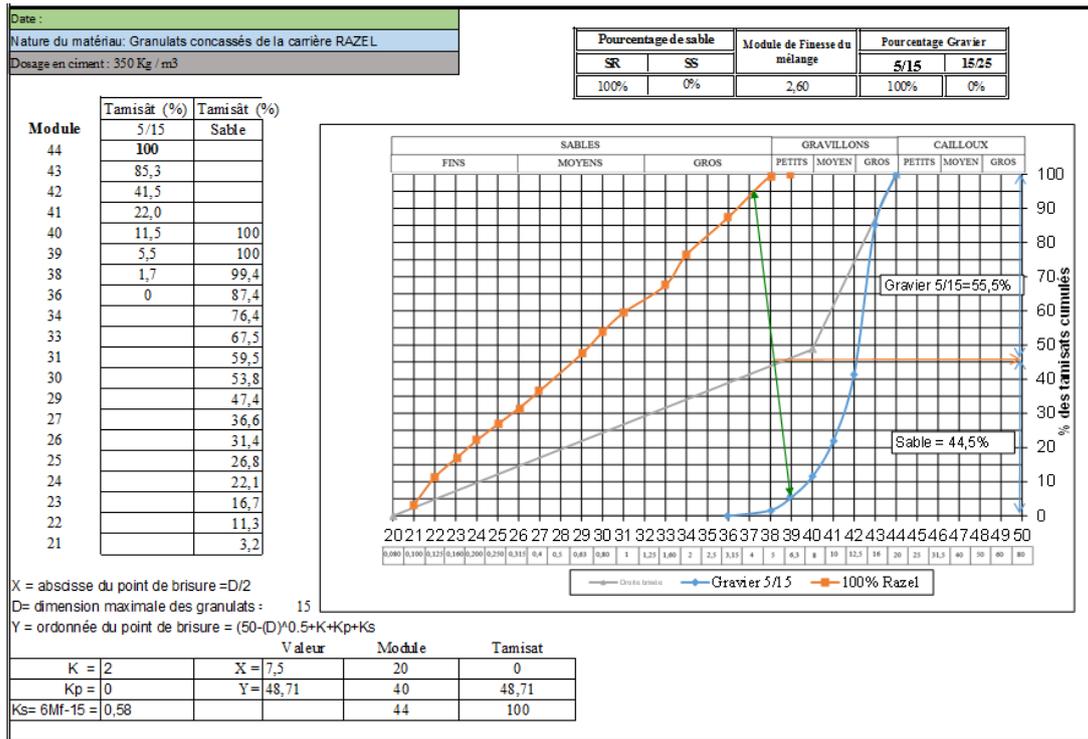


Figure Annexe 13 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 100% SR + 0% SS

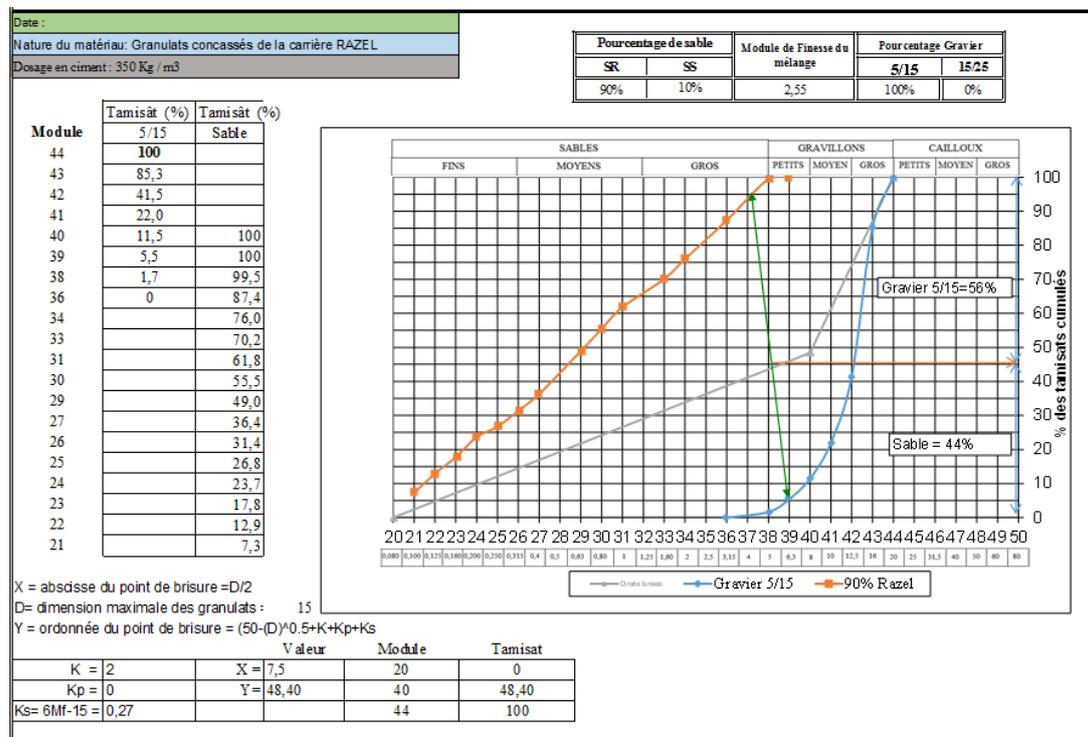


Figure Annexe 14 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 90% SR + 10% SS

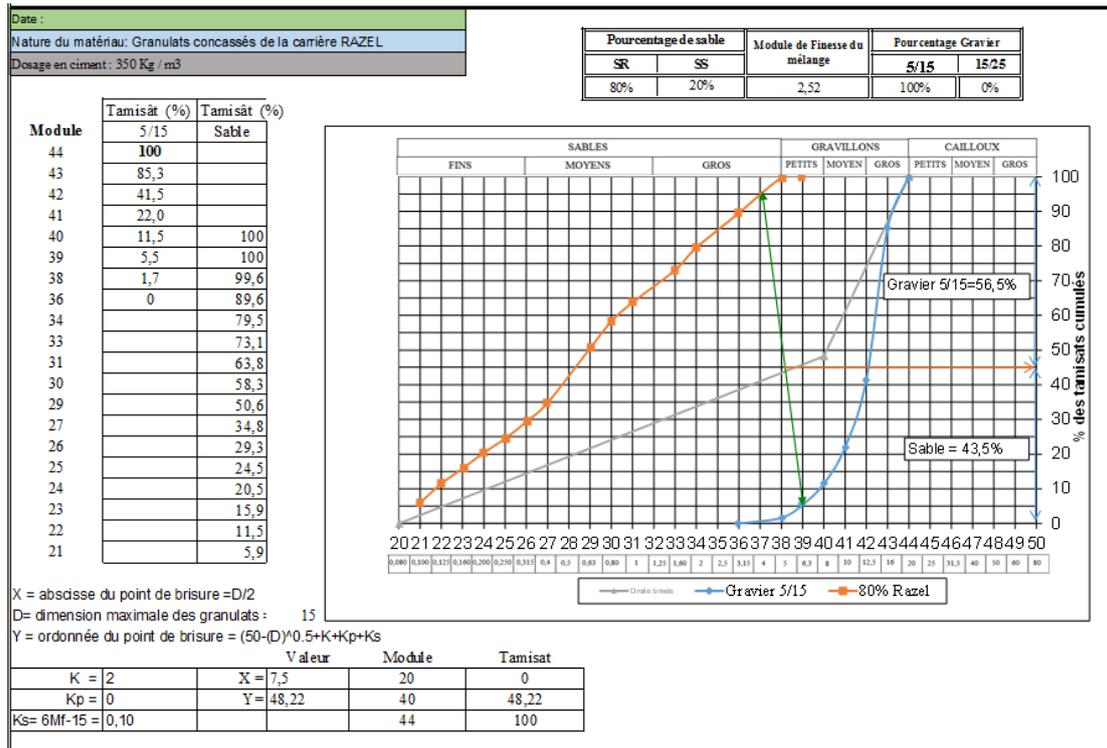


Figure Annexe 15 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 80% SR + 20% SS

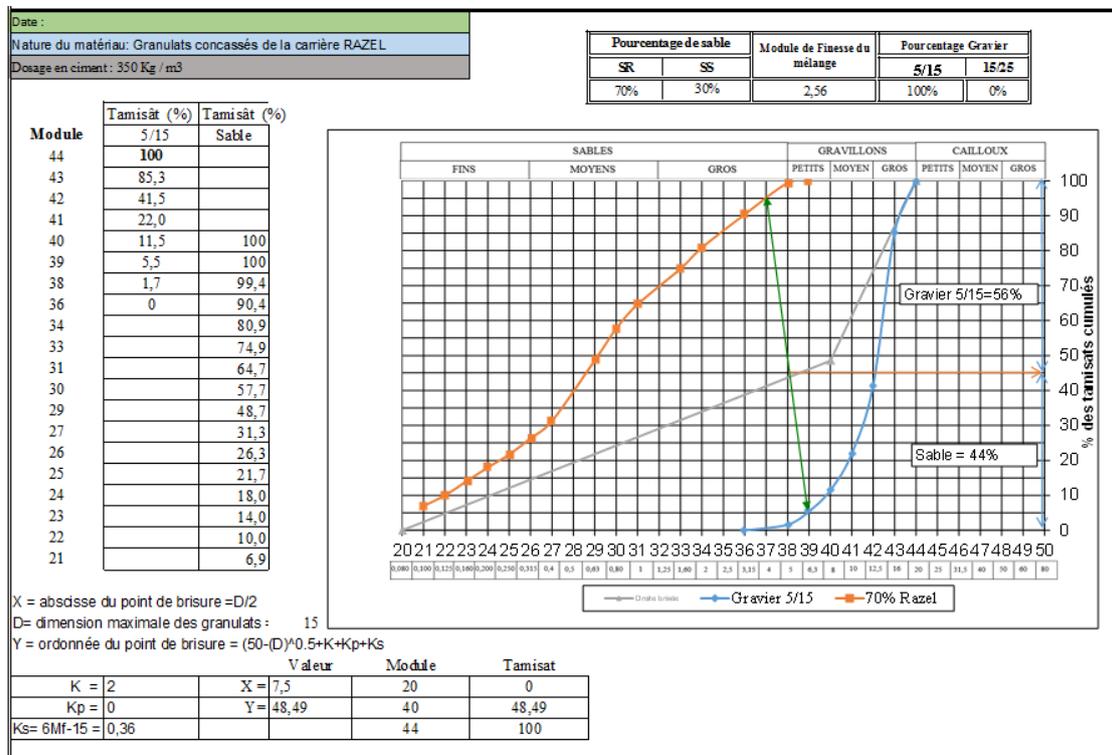


Figure Annexe 16 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 70% SR + 30% SS

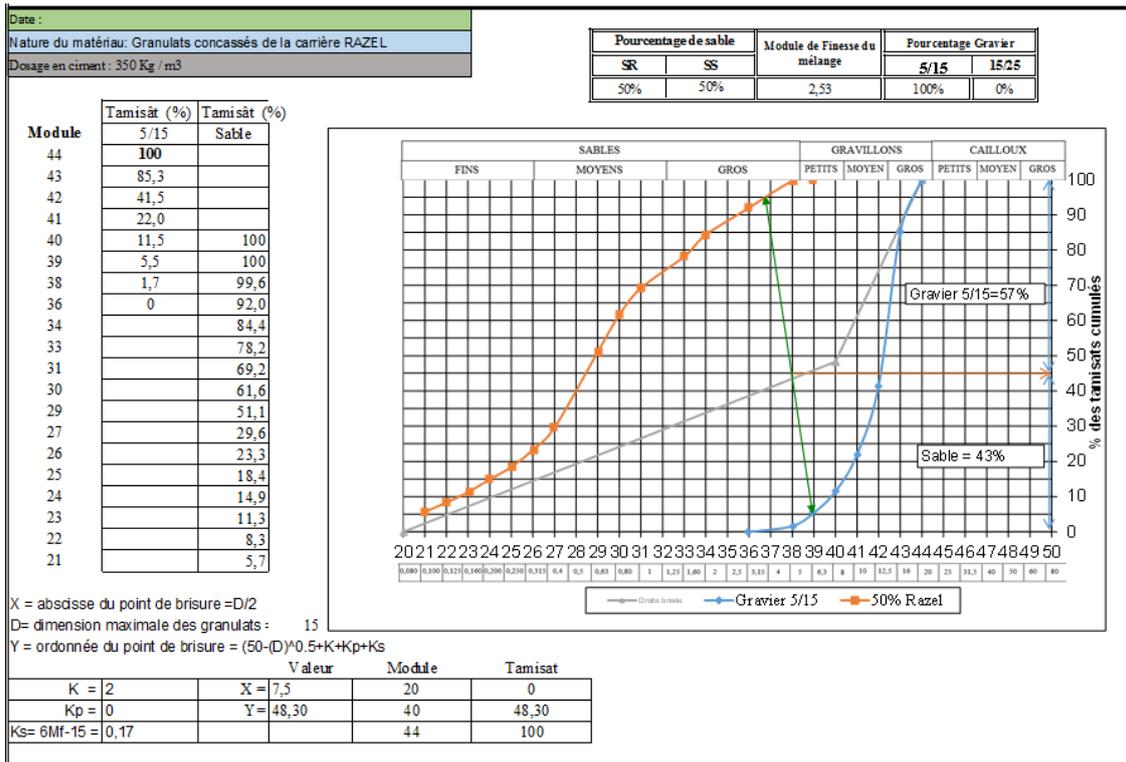


Figure Annexe 17 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 50% SR + 50% SS

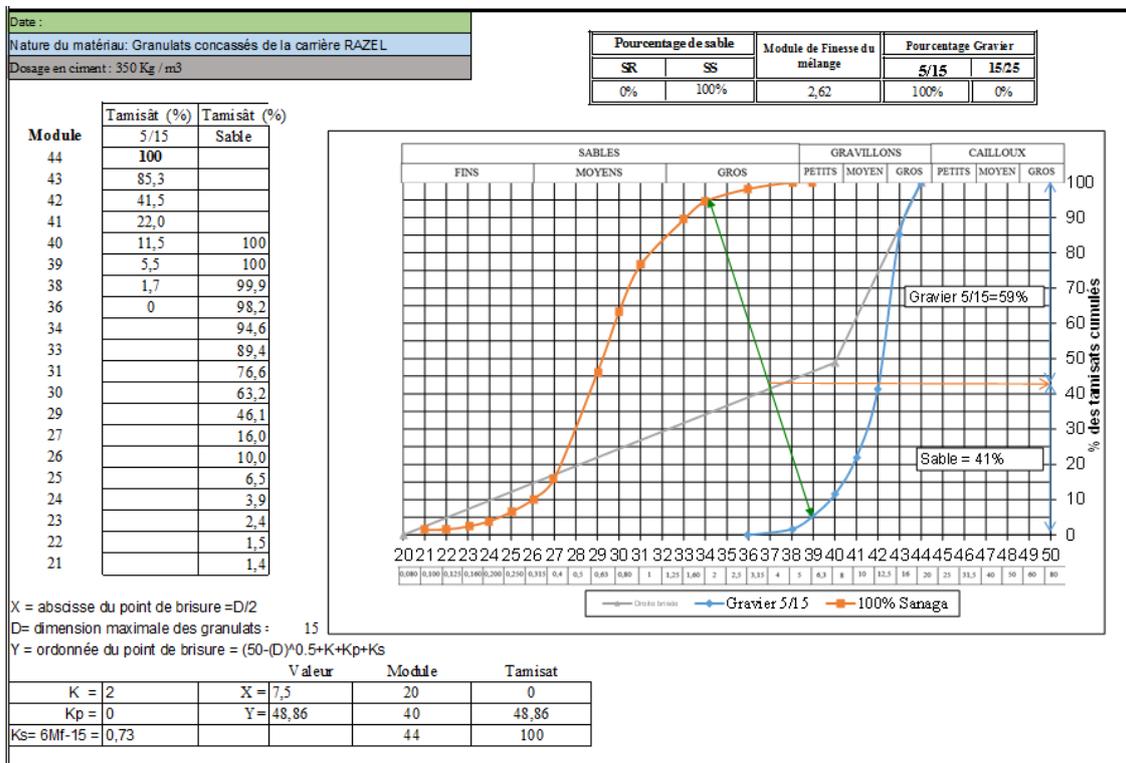


Figure Annexe 18 : Distribution granulométrique pour composition de bétons de 100% SR + 0% SS

➤ ANNEXE 2 : FICHE TECHNIQUE CIMENT DANGOTE



Base Elf – Port Autonome
de Douala (PAD)
P.O Box 4839 – Bonanjo Base Elf
Tel: +237 699.717.182
Email:
dangotecameroon@dangote.com

**TECHNICAL
SPECIFICATIONS
NC CEM II/ B-P 42.5R**

**COMPOSITION OF PORTLAND CEMENT IN CONFORMITY TO THE CAMEROONIAN
STANDARDS**

NC 234: 2009-06

Main constituents	(%)
Clinker	65-79
Secondary constituents:	(%)
Pouzzolana (%)	21- 35
Gypsum	≤ 5%

Chemical characteristics:	(%)
MgO	□ ≤ 5.0
Sulphate content SO3	≤ 3.5
Cl	≤ 0.02

Additives
Grinding agent

Physical characteristics	
Powder	
Fineness (Cm ² /g)	3900-4000
Paste	
Initial setting time (min)	≥ 60
Expansion – (Soundness) (mm)	≤ 10

Mechanical characteristics	
Compressive strength	MPa
2 days	≥ 20
28 days	≥ 42.5
	≤ 62.5

USES

Pre-cast re-inforced concrete, Flyovers, columns, beams, slabs, blocks, soil stabilization, reinforced walls, vaults, Marine Construction. Any work requiring quick setting, quick demoulding and high strength.

ADVANTAGES

Cement with low Alkalis, cement with low heat of hydration (LH).

RECOMMENDATIONS

Avoid under dosage and comply with the manufacturer's guide.

Mixing: avoid excess water. Mortars and concretes which are too wet have greatly reduced resistance and crack over time.

Note: Consider the aggregate moisture during the rainy season

Curing: do not demantle before 24h. Heat, wind, and sun can cause the formation of early cracks in mortars and concrete not protected against desiccation, especially in thin parts of concretes such as (salls, floors).

Protection during the first 48 hours is very important and may be provided by any appropriate means such as: curing of the product, watering either by spraying, use of rugs, etc.

Safety: Although it has no harmful effect on dry skin, care should be exercised by using waterproof or other suitable protective clothing when working with wet mortar due to its alkaline nature.

Avoid dry cement contact with the eyes, mouth and nose when mixing mortar. In case of direct contact of cement with any human part, wash off immediately and thoroughly with clean water.