

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire Construction et Environnement

L.C.E

Thèse de Doctorat en Sciences

Option : Génie Civil

Présentée par

Boulkhiout Messaouda épouse Cherrak

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'USTHB
Magister en Matériaux de l'Ecole Nationale Polytechnique

Valorisation des tufs dans le béton

Président :	Mme MORSLI Meriem	Professeur, ENP
Directeur de thèse:	Mr. BALI Abderrahim	Professeur, ENP
Co-Directeur :	Mr. SILHADI Kamel	Maître de Conférences/A
Examineurs :	Mme KETTAB Ratiba	Professeur, ENP
	Mr. BEDERINA Madani	Professeur, U. de Laghouat
	Mr. OUDJIT Mohamed Nadjib	Professeur, USTHB
	Mr. MENADI Belkacem	Professeur, U. de Blida 1
Invité :	Mr. AFRA Hamid	Directeur de Recherche, DG, CNERIB

Remerciements

Le travail entrepris pour la concrétisation de cette thèse a abouti grâce au concours des efforts de nombreuses personnes que j'ai côtoyées. Que chaque personne ayant contribué à cela soit sûre de ma gratitude et parfaite considération.

Qu'il me soit permis de remercier et de rendre un hommage particulier à mon Directeur de thèse, Mr Abderrahim BALI, Professeur à Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour m'avoir confié, dirigé et suivi ce travail. La confiance qu'il m'a témoignée, sa patience et son humanisme m'ont permis de mener à terme cette recherche. Les mots me font défaut pour décrire fidèlement son indulgence et son soutien sans lesquels je n'aurais pu surmonter les obstacles et me remettre sur pieds après chaque trébuché. Qu'il trouve ici mes plus vifs remerciements et le témoignage de toute ma gratitude pour sa générosité et l'amabilité de son âme.

Je remercie Mr Kamel SILHADI, Maître de Conférences à l'ENP, d'avoir co-encadré ce travail. Ses conseils et orientations ont été déterminants dans l'orientation de la recherche et la définition de ses axes de base.

Toute ma gratitude va vers Mr Hamid AFRA, Directeur de Recherche, Directeur Général du CNERIB, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler au CNERIB. Je tiens à souligner son esprit d'équité et son indulgence. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma considération et mon profond respect.

Je n'oublie pas de remercier vivement Mr El Hadi BENYOUCEF pour son indéniable soutien et sa précieuse assistance.

Mes vifs remerciements vont naturellement à Mme Meriem MORSLI, Professeur à l'ENP. Je lui suis reconnaissante de me faire l'honneur de présider mon jury de soutenance mais aussi de m'avoir prise sous son aile. Sa sagesse et son soutien ont été ma lanterne dans les moments obscurs. La confiance qu'elle m'a témoignée et ses encouragements pour aller de l'avant constituaient une force incroyable qui m'aidait à me relever et à avancer. Restez ainsi une source de renouvellement qui motive les jeunes chercheurs.

Je remercie également Mme Ratiba KETTAB, Professeur à l'ENP, ainsi que Mr Madani BEDERINA, Professeur à l'université de Laghouat; Mr Mohamed Nadjib OUDJIT Professeur à l'USTHB et Mr Belkacem MENADI, Professeur à l'Université de Blida1, qui

ont bien voulu faire partie du jury et examiner ma thèse. Je leur exprime ma profonde reconnaissance pour leur lecture critique et éclairante sur ce travail et ce malgré leurs occupations multiples.

Je ferai aussi mention expresse de la contribution significative du personnel du laboratoire du CNERIB. Je citerai en particulier Mr Youcef BENNA et toute son équipe notamment, Mohamed et Ferhat. Je suis touchée aussi par l'aide du personnel du Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) me donnant accès libre à leur base de données sur les matériaux locaux disponibles en Algérie et mettant à ma disposition les échantillons de tufs nécessaires pour l'exécution de l'expérimentation. Par la même occasion, j'adresse tout particulièrement ma gratitude à Mr Z. DJIJELI, Directeur au Ministère des Travaux Publics, pour son accueil chaleureux et ses recommandations.

Enfin, je dédie ce manuscrit en gage de reconnaissance avec tout mon amour :

A ma mère chérie.

A la mémoire de mon père pour qui j'aurais tout donné pour l'avoir à mes côtés en cet heureux événement : je l'imagine assis au premier rang, les jambes croisées, les yeux grand ouverts, pleins d'encouragement, de fierté et de tendresse. Que la miséricorde de Dieu soit sur lui.

A mes enfants Manel, Ahmed, Amine et mon époux Salah qui m'ont portée, encouragée et motivée. C'est grâce à leur amour et leur sacrifice que j'en suis là aujourd'hui.

A toute ma famille, frères et sœurs,

A tous mes amis.

ملخص:

العمل المنجز في إطار هذا البحث ينص على استخدام المواد المحلية لاسيما الطف الكلسي في الخرسانة. النمو الذي تمر به البلاد مع انطلاق المشاريع الكبرى أدى إلى نقص في مواد البناء عامه و مادة الرمل خاصة. الطف الكلسي، الموجود بوفرة و المستعمل بنجاح في بناء الطرقات، يمكن أن يشكل مصدرا للإستبدال. في هذا السياق، تم وضع برنامج تجريبي بهدف دراسة إمكانية استعمال و تأثير الطف، عن طريق استبدال جزئي للرمال، في صياغة الخرسانة. الخصائص الانسيابية، الميكانيكية و الفيزيائية للخرسانة العادية المكونة من طف حطاطية و بوغزول، المضاف بنسب 05، 15، 25 و 35 %، درست و قورنت مع نتائج خرسانة مرجعية بدون طف تحتوي على رمل الوادي. إدخال الطف في الخرسانة إستلزم إستخدام الملدن المتفوق لتجاوز مشكلة فقدان السلسلة الناتج عن المعدل المرتفع للجزئيات الدقيقة المحتواة في الطف. أعلى قيمة للخصائص الميكانيكية لوحظت عند 25 % إضافة من الطف. في الواقع، فإن المكسب في مقاومة ضغط الخرسانة عند هذا المعدل هو 13% بالنسبة لطف بوغزول و 33% بالنسبة لطف حطاطية. في المقابل الخصائص الفيزيائية و الكيميائية شهدت نقص بالمقارنة مع تلك المحصل عليها مع الخرسانة المرجعية، ربما يعود هذا إلى طبيعة الطف عالي الامتصاص. النتائج المتحصلة عليها باستعمال الطف في صناعة الخرسانة المرصوة ذاتيا تعتبر واعدة مع إمكانية استبدال جزئي يصل إلى 35 % و أدت إلى خرسانة ذات سيولة أكبر من 69 سم و مقاومة ضغط تقارب 50 ميجا باسكال.

الكلمات الرئيسية: الطف الكلسي، الرمل، الخرسانة، الخرسانة المرصوة ذاتيا، الخواص الميكانيكية، و الخواص الانسيابية، أوساط قاسية.

Résumé :

Les travaux entrepris dans le cadre de cette recherche portent sur la valorisation des matériaux locaux, en l'occurrence le tuf calcaire dans le béton. Un déficit en sable a été généré suite à l'essor qu'a connu le pays avec le lancement de grands projets. Le tuf calcaire, matériau abondant et largement utilisé avec succès en technique routière, peut constituer une ressource de substitution envisageable.

Dans cette optique, un programme expérimental a été entrepris ayant pour objectif l'étude de la faisabilité et de l'influence de l'ajout de tuf calcaire par substitution partielle au sable dans la formulation de béton ordinaire puis dans la formulation de béton autoplaçant. Les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et physiques des bétons ordinaires formulés avec deux tufs, notamment de Boughezoul et de Htattba, à des pourcentages de substitution de 5, 15, 25 et 35%, sont étudiées et comparées à celles d'un béton témoin à base de sable alluvionnaire.

L'introduction du tuf calcaire dans le béton a nécessité le recours à un superplastifiant pour palier au problème de perte de maniabilité induit par le taux de fines élevé des tufs. Il a été constaté qu'à 25% d'ajout, les performances mécaniques des bétons sont maximales. En effet, le gain de résistance à la compression des bétons adjuvantés à ce taux est de 13 % pour le tuf de Boughezoul et de 33 % pour le tuf de Htattba. En revanche, les caractéristiques physiques et chimiques de ces bétons se sont révélées amoindries, en comparaison avec celles du matériau témoin, à cause de son probable caractère absorbant.

Concernant l'utilisation du tuf dans la formulation des bétons autoplaçants, les résultats obtenus s'avèrent prometteur permettant une substitution allant jusqu'à 55%, débouchant sur des BAP fluides ayant des étalements conformes supérieurs à 69 cm, et des résistances avoisinant 50 MPa.

Mots clés : Tufs calcaires, sable, béton, béton autoplaçant, propriétés mécaniques, propriétés rhéologiques, milieux agressifs.

Abstract

The work carried within this research focuses on the valorization of local material, such as calcareous tuff, in concrete. A deficit that was generated following the growth experienced by the country with the launch of huge and ambitious projects. Tuff, abundant and widely used successfully in road building, can be a alternative feasible.

In this context, an experimental program was undertaken with the objective to study the feasibility and the influence of the calcareous tuff addition as partial substitution of sand in the formulation of ordinary concrete and in the formulation of self-compacting concrete. The studied Tuffs are those of Boughezoul and Htattba. Rheological, mechanical and physical characteristics of ordinary concretes made with these two tuffs at 5, 15, 25 and 35% percentages of substitution, are studied and compared with those of a reference concrete.

The introduction of calcareous tuff in concrete requires the use of a superplasticizer to overcome the problem of loss of workability induced by high levels of fine tuffs. It was found that at 25% of addition, mechanical performances of concretes are maximal. Indeed, the gain of compressive strength of concrete with superplasticizer at this rate is 13% for the Boughezoul tuff and 33% for the Htattba tuff. However, the chemical and physical characteristics of these concretes have proven lessened in comparison with those of the control material, because of its likely absorbing character.

Regarding the use of tuff in the formulation of self-compacting concrete, the obtained results prove to be promising for the substitution of up to 35%, leading to fluid SCC with above 69 cm smears consistent, and resistance around 50 MPa.

Keywords: calcareous tuffs, sand, concrete, self-compacting concrete, mechanical properties, rheological properties, aggressive environments.

TABLE DES MATIERES

PRINCIPALES NOTATIONS	i
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	----------

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LES TUFS CALCAIRES

1.1. Introduction	4
1.2. Définition	5
1.3. Répartition dans le monde	5
1.4. Extension géographique des encroûtements calcaires en Algérie	6
1.5. Formation géologique des encroûtements calcaires	7
1.5.1. Hypothèses de formation d'après différents pédologues	7
1.5.2. Processus chimique	8
1.5.3. Facteurs de formation	9
1.5.4. Classification	11
1.6. Caractéristiques des tufs calcaires	15
1.6.1. Granularité	15
1.6.2. Caractérisation de la résistance à la fragmentation et à l'usure	15
1.6.3. Propreté et teneur en éléments fins (équivalent de sable)	16
1.6.4. Nocivité des fines (essai au bleu de méthylène)	16
1.7. Utilisation des tufs Calcaires	16
1.7.1. Utilisation en technique routière	16
1.7.1.1. Stabilisation de tuf par des liants hydrauliques	17
1.7.1.2. Mélange de tuf avec des granulats	18
1.7.1.3. Tufts – Sable de dune	18
1.7.1.4. Tuf sable de concassage	19
1.7.1.5. Confection de bloc pour construction	20
1.7.2. Utilisation du tuf comme intrant de substitution dans le béton : état des connaissances	20
1.7.3. Perspective d'utilisation du tuf calcaire dans le béton	21
1.8. Conclusion	22

CHAPITRE II: SABLE POUR BETON

2.1. Introduction	24
2.2. Définition et origine des sables	25
2.3. Caractéristiques normatives des sables à béton	25
2.3.1. Granularité et classification des grains de sable	25
2.3.2. Module de finesse des sables	26
2.3.3. Propreté des sables	27
2.3.4. Foisonnement des sables	28
2.3.5. Friabilité des sables	29
2.3.6. Les Analyses Chimiques	29
2.3.7. Récapitulatif des caractéristiques des sables à béton	30
2.4. Les sables pour béton disponibles en Algérie	31
2.4.1. Sable de concassage	31
2.4.1.1. Définition	31
2.4.1.2. Origine et disponibilité	32
2.4.1.3. Caractéristiques des sables de concassages	32
2.4.1.4. Utilisation des sables de concassage dans le béton	33
2.4.2. Sable de dune	37
2.4.2.1. Définition d'un sable de dune	37
2.4.2.2. Formation et localisation des sables de dune	38
2.4.2.3. Caractéristiques des sables de dune	39
2.4.2.4. Utilisation des sables de dune dans le béton	42
2.5. Production de sable en Algérie	43
2.5.1. Production de sable de concassage	43
2.5.2. Production de sable naturel	45
2.6. Conclusion	47

CHAPITRE III : LES BETONS

3.1. Introduction	49
3.2. Bétons usuels	50
3.2.1. Constituants du béton	50
3.2.1.1. Le ciment	50
3.2.1.2. Les granulats	50
3.2.1.3. Eau de gâchage	51
3.2.1.4. Les adjuvants	51
3.2.2. La composition du béton	51
3.2.3. Propriétés du béton	52
3.2.3.1. Ouvrabilité	53
3.2.3.2. Masse Volumique et teneur en air	54
3.2.3.3. Résistance à la compression	55
3.2.3.4. Résistance à la traction	56
3.2.3.5. Perméabilité des bétons	56
3.2.3.6. Absorption d'eau des bétons	58
3.2.3.7. Résistance du béton aux acides	59
3.2.3.8. Résistance au sulfate	60
3.3. Les bétons autolaçants (BAP)	62
3.3.1. Définition et avantages des BAP	62

3.3.2. Propriétés des BAP à l'état frais	63
3.3.3. Propriétés des BAP à l'état durci	64
3.3.4. Méthode de formulation des BAP	64
3.3.5. Spécificités de formulation des BAP	65
3.3.5.1 Un volume de pâte élevé	66
3.3.5.2. Importante quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$)	66
3.3.5.3. Usage de superplastifiants	67
3.3.5.4. Utilisation d'agent de viscosité	67
3.3.5.5. Gravillon	69
3.3.6. Utilisation des plans d'expériences pour la formulation des BAP	70
3.4. Conclusion	71

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : MATERIAUX ET FORMULATIONS DES BETONS

4.1. Introduction	73
4.2. Caractérisation des matériaux de base	73
4.2.1. Tufs	73
4.2.2. Granulats	75
4.2.3. Ciment	76
4.2.4. Superplastifiant	77
4.3. Programme expérimental	77
4.3.1. Formulation des bétons usuels à base de tufs avec et sans superplastifiant	77
4.3.2. Formulation des bétons auto-plaçants (BAP)	78
4.4. Composition des bétons à base de tufs calcaires	79
4.4.1. Composition des bétons usuels	80
4.4.2. Composition des Bétons auto-plaçants	82
4.4.2.1. Construction d'un plan d'expériences	82
4.4.2.2. Choix des facteurs	82
4.4.2.3. Choix du plan d'expériences	83
4.4.2.4. Compositions des bétons auto-plaçants	84
4.5. Préparation d'échantillons, corps d'épreuves et essais	85

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

5.1. Introduction	88
5.2. Bétons usuels à base de tufs calcaires	88
5.2.1. Maniabilité (béton à teneur en eau constante)	88
5.2.2. Air occlus	89
5.2.3. Masse volumique	90
5.2.4. Résistance à la compression	91
5.2.5. Résistance à la traction par flexion	93
5.2.6. Propriétés physiques	95
5.2.6.1. Absorption totale	95
5.2.6.2. Absorption par capillarité	96
5.2.6.3. Perméabilité des bétons	97

5.2.7. Résistance en milieux agressifs	99
5.2.7.1. Résistance aux acides des bétons à base de tufs	99
5.2.7.2. Résistance aux sulfates des bétons à base de tufs	101
5.3. Béton auto-plaçant avec tuf calcaire	103
5.3.1. Etalement	105
5.3.2. Stabilité au tamis	106
5.3.3. Taux de remplissage à la boîte en L	108
5.3.4. Etude de la résistance à la compression	109
5.4. Conclusion	111
CONCLUSION GENERALE	113
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117

PRINCIPALES NOTATIONS

F	coefficient de foisonnement
V_{humide}	volume de sable pour une humidité donnée
V_{sec}	volume de sable sec
FS	coefficient de friabilité
e	volume d'eau
v	volume de vides
Pas	moitié de la différence entre le niveau haut et le niveau bas des facteurs
Pk	point kilométrique utilisé sur les routes pour permettre de situer un endroit précis
C_i	absorption capillaire ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)
M	masse totale d'eau absorbée depuis le début de l'immersion (g)
S	section de la face inférieure de l'éprouvette de l'essai capillaire (cm^2)
t	temps (s).
x	profondeur de pénétration maximale de l'eau dans le béton (m)
h	charge hydraulique (m)
v	pourcentage du volume de béton occupé par les pores (%)
K_{eau}	coefficient de perméabilité à l'eau (m)
M_1	masse des éprouvettes avant l'immersion (g)
M_2	masse des éprouvettes après une immersion (g)
H_2SO_4	acide sulfurique
HCl	acide chlorhydrique
MgSO_4	Sulfate de magnésium
Na_2SO_4	Sulfate de sodium
TR	taux de remplissage de la boîte en L (%)
H_1 et H_2	hauteurs de remplissage de la boîte en L (cm)
R_{c28} , R_c	résistance à la compression à 28 jours
R_f	résistance à la traction par flexion
RN	route nationale
I_{CBR} ,	Indice de portance caractérisant les matériaux de chaussées
W_{OPM}	teneur en eau optimale de l'essai Proctor
CaCO_3	carbonate de calcium
SiO_2	silice
Al_2O_3	alumine
Fe_2O_3	oxyde de fer
CaO	chaux
MgO	magnésie
SO_3	sulfure
K_2O	potassium
Na_2O	sodium
P_2O_5	oxyde de phosphate
TiO_2	titan
Cl^-	ions de chlorure
ρ_a	masse volumique apparente (kg/m^3)
ρ_s	masse volumique absolue (kg/m^3)
MF	module de finesse du sable
A_{bs}	absorption (%)
LA	Los angeles (%)
A	aplatissement (%)

P_r	propreté (%)
Pa.s	Pascal par seconde, unité de mesure de la viscosité au rhéomètre
V_b	valeur au bleu de méthylène
C	facteur ciment
T	facteur tuf
S	facteur superplastifiant
BO	béton ordinaire de référence sans tufs
A5	béton ordinaire à base de tuf de Htattba à 5 % de substitution
A15	// // // // // 15 % //
A25	// // // // // 25 % //
A35	// // // // // 35 % //
B5	béton ordinaire à base de tuf de Boughezoul à 5 % de substitution
B15	// // // // // à 15 % //
B25	// // // // // 25 % //
B35	// // // // // 35 % //
AFREM	Association Française de Recherches d'Essais et Matériaux de construction
M.T.P	Ministère des Travaux Publics
L.C.T.P	Laboratoire Central des travaux Publics
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
C-S-H	silicates de calcium hydratés
$Ca(OH)_2$	portlandite
Mini Tab	logiciel pour élaboration et analyse des plans d'expériences
Ins.	Insolubles
PF	perte au feu
C_3S	Alite (silicate tricalcique : $3CaO.SiO_2$)
C_2S	Bélite (silicate bicalcique : $2CaO.SiO_3$)
C_3A	Aluminate tricalcique ($3CaOAl_2O_3$)
C_4AF	Ferroaluminate tetracalcique ($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$)

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Répartition des encroûtements calcaires dans le monde (Colombier,1988)	6
Figure 1.2 : Distribution des encroûtements calcaires en Algérie d'après J.H. Durand, 1959 cité par [Alloul, 1981]	7
Figure 1.3 : Carte pluviométrique de l'Algérie d'après J.Dubief, 1950 cité par [Horta, 1979]	11
Figure 1.4 : Encroûtement mûr	12
Figure 1.5 : Quelques exemples de profils calcaires de sols différenciés d'après [Ruellan, 1967]	13
Figure 2.1 : Les résistances des bétons avec sable de concassage en fonction du taux de fines	34
Figure 2.2 : Répartition des sables de dune dans le monde [Pye, 2009]	38
Figure 2.3. Situation géographique des ergs de l'Algérie [Tafraoui, 2009]	39
Figure 2.4 : Courbes granulométriques de deux sables de dunes [Ben Dhia, 1998]	41
Figure 2.5 : Evolution de la production de sable concassé. [Rap Mines, 2009]	44
Figure 2.6 : Production nationale du sable concassé par secteur, [Rap Mines, 2009]	45
Figure 2.7 : Production nationale du sable naturel par secteur, année 2009	46
Figure 2.8 : Production du sable naturel par wilaya-année 2009 [Rap Mines, 2009]	46
Figure 2.9 : Evolution de la production nationale du sable naturel période 2000 – 2009 [Rap Mines, 2009]	47
Figure 3.1: Evolution de la maniabilité de béton formulé avec trois sable de dune [El Harthy, 2007]	54
Figure 3.2: Variation de Rc en fonction de E/C et l'absorption « p » des granulats [Angulo, 2010]	55
Figure 3.3: Définition de la perméabilité	56
Figure 3.4: Influence de l'interconnectivité des pores sur la perméabilité de la pâte	58
Figure 3.5: Influence de la cure sur la perméabilité du béton [Desmettre, 2011]	58
Figure 3.6: Prisme de mortier dont la partie droit a subi l'attaque d'un acide	60
Figure 3.7: Dégradation d'un pilonne d'un pont en contacte avec sol riche en sulfate	61
Figure 3.8: Augmentation de volume (gonflement) d'un prisme de mortier maintenu dans une solution à haute teneur en sulfate	61
Figure 3.9 : Finesse d'un filler et le comportement rhéologique de BAP [Billberg, 2001]	67
Figure 3.10 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Assié, 2004]	68
Figure 3.11: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, [Assié, 2004]	68
Figure 3.12: Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré	69
Figure 4.1 : Tufs calcaires utilisés	74
Figure 4.2 : Courbes granulométriques des granulats	76
Figure 4.3 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité	86
Figure 4.4 : Dispositif expérimental d'essai de perméabilité à l'eau	87
Figure 5.1 : Mesure de l'affaissement (cône d'Abrams)	89
Figure 5.2 : Affaissement des bétons avec et sans tufs calcaires	89
Figure 5.3 : Air occlus des bétons avec et sans tufs calcaires	90
Figure 5.4 : Influence de l'ajout de tufs calcaires sur la masse volumique des bétons	91
Figure 5.5 : Résistances à la compression des bétons à base de tuf calcaires sans adjuvants	91
Figure 5.6 : Résistance à la compression des bétons avec tufs calcaires adjuvantés	92
Figure 5.7 : Résistance à la traction par flexion des bétons	94
Figure 5.8 : Résistance à la traction par flexion des bétons à base de tuf calcaires avec adjuvant	94
Figure 5.9 : Absorption totale des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant	95
Figure 5.10 : Absorption totale du béton témoin et des bétons adjuvantés à base de tufs calcaires	96
Figure 5.11 : Absorption capillaire des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant	97
Figure 5.12 : Absorption capillaire du béton témoin et des bétons adjuvantés à base de tuf calcaires	97
Figure 5.13 : Perméabilité des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant	98
Figure 5.14 : Perméabilité des bétons à base de tufs calcaires avec adjuvant	98
Figure 5.15 : Eprouvettes de béton immergées dans les solutions acides	100
Figure 5.16 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% d'acide chlorhydrique	100
Figure 5.17 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% d'acide sulfurique	101

Figure 5.18 : Eprouvettes de béton immergées dans les solutions sulfatées	102
Figure 5.19 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% de sulfate de sodium	103
Figure 5.20 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% sulfate de magnésium	103
Figure 5.21 : Essais d'étalement (a) et de la boîte en L d'un BAP	104
Figure 5.22 : Diamètres d'étalement des BAP à base de tuf calcaire de Htattba	105
Figure 5.23 : Effet des différents facteurs sur l'étalement des BAP	106
Figure 5.24 : Stabilité au tamis des BAP à base de tuf calcaire de Htattba	107
Figure 5.25 : Effet des différents facteurs sur la stabilité au tamis des BAP	107
Figure 5.26 : Taux de remplissage à la boîte en L des BAP à base de tuf calcaire de Htattba	108
Figure 5.27 : Effet des différents facteurs sur le taux de remplissage à la boîte en L des BAP	109
Figure 5.28 : Résistance à la compression des BAP à base de tuf calcaire de Htattba	110
Figure 5.29 : Effet des différents facteurs sur la résistance à la compression des BAP	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Classification des encroûtements calcaires d'après [Ruellan, 1967]	13
Tableau 1. 2 : Chronologie des différentes formations en Maghreb (Alloul, 1981)	14
Tableau 2.1 : Fuseau granulaire d'un sable pour béton	26
Tableau 2.2 : Classification des sables selon la grosseur de leurs grains [Dreux, 1998]	26
Tableau 2.3 : Tableau récapitulatif des exigences relatives à un sable pour béton [NA 5043 ; Instruction, 2007]	30
Tableau 2.4 : Réserves et capacité de production des granulats de l'E.N.G [Rapport Mines, 2009]	32
Tableau 2.5 : Caractéristiques de quelques sables de concassages	33
Tableau 2.6 : Exemples de caractéristiques de sables de dune algérien [Benna, 2005]	40
Tableau 2.7 : Récapitulatif des caractéristiques des sables de dunes	41
Tableau 4.1 : Caractéristiques physique et chimique des tufs calcaires utilisés	75
Tableau 4.2 : Propriétés des granulats utilisés	76
Tableau 4.3 : Compositions du ciment	77
Tableau 4.4 : Composition des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant, [kg/m ³]	81
Tableau 4.5 : Composition des bétons à base de tufs avec superplastifiant, [kg/m ³]	81
Tableau 4.6 : Facteurs et leurs niveaux	83
Tableau 4.7 : Matrice d'expériences	84
Tableau 4.8 : Composition des BAP à base de tufs calcaires de Htattba, [kg/m ³]	84
Tableau 5.1 : Récapitulatif des résultats obtenus sur les BAP	104

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est un pays en plein essor. Le développement touche tous les secteurs, notamment le secteur du BTPH, avec le lancement d'importants programmes de logements et d'infrastructures. Dès lors, l'industrie de la construction fait face à un problème crucial de la demande en granulat, notamment le sable, qui a induit une exploitation effrénée des sables d'oueds et de mer pour répondre aux besoins du marché. Cette surexploitation, a engendré une menace aux nappes alluviales et une dégradation inquiétante de l'environnement. Face à cette situation, le gouvernement Algérien a décrété la loi n° 05-12 du 4 août 2005 qui interdit l'extraction des matériaux alluvionnaires et ce à partir du 04 septembre 2007, particulièrement dans la région du centre.

Par conséquent, pour combler le déficit en matière de sable essentiellement, la recherche par les opérateurs, d'autres alternatives, avec l'utilisation de matériaux de substitution, s'impose d'elle-même. Dans cette optique plusieurs tentatives sont entreprises. En premier lieu, les sables de concassages ont suscité un grand intérêt déjà vers les années 80. Ils constituent une solution envisageable au problème d'approvisionnement à condition que leur taux de fines s'insère dans les limites normatives tolérées [EN 12620, 2008 ; XP P 18-545, 2004]. Plusieurs études ont été consacrées à cette question de fines où il s'est avéré qu'un pourcentage de 15% et même plus, est tout à fait admissible [Ramirez, 1987; Nehdi, 1996 ; Menadi, 2009]. Par ailleurs les sables de dunes, largement disponibles au sud algérien, ont eux aussi, fait l'objet de plusieurs investigations en vue de leur valorisation dans l'industrie du béton. Les résultats obtenus sont prometteurs et montrent que ce matériau peut être exploité surtout pour les bétons de sable et constituer ainsi une ressource locale non négligeable [Batata, 1991 ; Bédérina, 2005 ; Kettab, 2007 ; Al-Harthy, 2007].

D'autres tentatives sont entreprises en parallèle ayant essentiellement un objectif environnemental (valorisation des déchets de construction) en plus de celui d'élargir la gamme de matériaux susceptibles d'être employés comme sable à béton [Debieb, 2008; Kenai, 2010; Hebhoub, 2011]. En effet, les sinistres naturels tels les séismes et les crues ont engendré des quantités énormes de déchet de construction. Des recherches portant sur leur valorisation dans le domaine de la construction sont engagées afin de contribuer à la résolution du problème de stockage des déchets et à la préservation des ressources naturelles. L'utilisation en tant que granulats de ces déchets seuls dans le béton est prohibée vu l'augmentation de la porosité et la perméabilité pouvant être préjudiciable pour la pérennité

des ouvrages [Kenai, 2010]. Néanmoins, les déchets de briques broyées constituent un substitut partiel de sable à hauteur de 50% sans nuire aux performances initiales [Bedjou, 2003; Debieb, 2008].

Toutefois, même avec l'apport de ces matériaux palliatifs, les attentes du marché sont loin d'être satisfaites et la recherche d'autres alternatives reste nécessaire pour combler l'insuffisance. A cet effet, suite à l'abondance des tufs calcaires couvrant une superficie appréciable de près de 300 000 Km² en Algérie, qu'a émergé l'idée de recours à ce matériau à cette fin. A l'origine, c'est un matériau ayant un processus de formation et des caractéristiques spécifiques [Peltier, 1959 ; Alloul, 1981 ; Ford, 1996; Morsli, 2007]. Il est largement utilisé avec succès en technique routière sous des conditions climatiques particulières dans plusieurs pays, en dépit de la non conformité de ses performances avec les normes en vigueur [Strouillou, 1984 ; Cherrak, 2003 ; Morsli, 2007]. En effet, les caractéristiques et les performances du tuf n'obéissent pas aux spécifications usuelles pour une utilisation en corps de chaussées. Néanmoins le hasard a fait que son exploitation soit une vraie réussite. La bonne tenue des premières chaussées réalisées dans le sud à la hâte avec les matériaux disponibles à proximité, pour l'exploitation des puits de pétrole, a surpris les spécialistes et les a incités à approfondir les connaissances sur ce matériau. Malheureusement, peu de travaux de recherche ont été consacrés à l'extension de leur utilisation dans la fabrication du béton en tant que substitut partiel du sable, en dépit de la nature calcaire des tufs qui s'accorde bien avec l'emploi des liants hydrauliques. Seule leur application avec du ciment comme stabilisant a été envisagée pour la réalisation de chaussées dans certains pays comme l'Argentine et la Tunisie, [Colombier, 1988; Ben Dhia, 1983]. Le ciment présente une bonne compatibilité avec le tuf en raison de sa nature calcaire [Ben Dhia, 1983 ; Cherrak, 2008].

L'absence de références bibliographiques sur le thème a incité à entreprendre les investigations en se référant à des recherches similaires faites sur divers matériaux de substitution, entre autres les sables de concassage et les sables de dunes. Le tuf calcaire étant un matériau semblable au sable de concassage de par sa nature minéralogique et le taux de fines élevé qu'il renferme, l'idée d'envisager son utilisation comme matériau de substitution paraît pertinente.

La présente recherche a pour objectif l'étude de l'intérêt que peut susciter l'incorporation des tufs comme constituant de substitution dans la fabrication du béton. La partie bibliographique, porte sur les définitions et les origines des tufs en Algérie, ainsi que leur

localisation géographique. Avant cela, un aperçu est introduit sur les sables à béton en évoquant leur origine et définition ainsi que la réglementation qui les gouvernent. Cette partie sera consacrée aux différents sables de substitution utilisés actuellement, notamment le sable de concassage et le sable de dune. La deuxième partie porte essentiellement sur l'étude expérimentale de la faisabilité de formulation de béton ordinaires et autoplaçant avec utilisation du tuf en tant que matériau de substitution. Des méthodes empiriques et de plan d'expérience sont utilisés pour la formulation de ces bétons. Pour l'étude de l'influence de l'ajout de ces tufs calcaires par substitution partielle au sable, sur les performances du béton à l'état frais et à l'état durci, plusieurs formulations sont élaborées. Les résultats expérimentaux présentés concernent la maniabilité, les résistances, l'absorption totale et capillaire, perméabilité à l'eau, ainsi que la tenue de ces bétons dans des milieux acides et sulfatés.

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LES TUF CALCAIRES

1.1. Introduction

Les tufs calcaires sont des matériaux largement disponibles dans les régions arides et semi-arides au relief relativement plat dans la plupart des pays du bassin méditerranéen. Il existe en Algérie, environ 66 carrières de tuf réparties dans 16 wilayas avec une capacité de production de 12 209 345 m³ en 2008 [Rap Min, 2009]. C'est un matériau essentiellement utilisé dans la construction des chaussées depuis 1956 en Algérie. A cette époque, les matériaux utilisés en corps de chaussées, devaient répondre à un certain nombre de spécifications rigoureuses sur la dureté, la granulométrie, la propreté, etc. Les chaussées traditionnelles sont constituées en général de couches de graves propres. Malheureusement ces matériaux nobles se raréfient dans certaines régions. La nécessité de construire des routes à coût optimisé a incité les ingénieurs à exploiter plus les matériaux locaux. La disponibilité des tufs souvent à proximité des tracés routiers, la facilité d'extraction et de mise en œuvre ainsi que la qualité des assises en tufs en ont fait des matériaux économiques largement utilisés. La bonne tenue des premières chaussées en tufs (RN 6 au sud de Saida, RN 1 entre Médéa et Laghouat et la RN 4 Oran), a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs tels que Fenzy et Peltier qui ont contribué à l'élaboration de règles spécifiques de choix et d'utilisation de ce matériau. Les recherches dans cet axe sont nombreuses et s'orientent vers une meilleure connaissance géologique et géomécanique de ces tufs. De notre part, compte tenu de la nature calcaire de ce type de tuf et les résultats rapportés dans la littérature sur leur stabilisation avec le ciment pour rehausser leurs performances mécaniques en chaussées, nous ont incité à tenter leur exploitation dans le béton. En effet, le développement important dans le domaine de la construction en Algérie a créé une grande tension sur les matériaux classiques où d'autres alternatives sont plus que nécessaire pour combler le déficit.

Ce chapitre est consacré à la définition des tufs, leur processus de formation, leur utilisation actuelle en technique routière ainsi que leur éventuelle exploitation dans le béton comme substituant au sable.

1.2. Définition

Depuis le siècle dernier (20^{ème} siècle) les géologues, pédologues et géomorphologues se sont passionnés pour ces formations que l'on a essayées de définir, de classer et d'expliquer la genèse. Plusieurs définitions du mot tuf ont été avancées. Dans le dictionnaire Larousse « le tuf est une roche poreuse légère formée de cendres volcaniques cimentées ou de concrétions calcaires déposées dans les sources ou dans les lacs ». Pour le géologue, une définition plus élaborée est donnée distinguant les tufs volcaniques des tufs calcaires. Les tufs calcaires sont des incrustations irrégulières et spongieuses qui se produisent à l'émergence des sources calcaires dans un bassin lacustre, le calcaire précipite en une fine poudre cristalline qui se stratifie en couches régulières, [Alloul, 1981].

De par le monde, ils sont appelés « calcrêtes » ou « caliche » dans les pays anglophones, « tosca » en Argentine et en Espagne, « tuf » ou « encroûtement calcaire » en Afrique du Nord. Ils se définissent comme étant des roches tendres, friables, poreuses, légères et de couleurs claires, composées essentiellement mais pas exclusivement de carbonate de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré, et sont dues à la cimentation et à l'accumulation du calcaire dans une zone d'infiltration, [Colombier, 1988]. Cette appellation « tufs » a été utilisée dans le langage courant et dans le jargon des techniques routières pour désigner des sols enrichis en calcaires formés sous un climat aride ou semi-aride et qui sont utilisés dans la construction de chaussées économiques. Dans cette étude les termes « tuf » ou « encroûtement calcaire » seront employés indifféremment pour désigner les tufs à dominance calcaire.

Suivant leur composition minéralogique, les tufs sédimentaires sont classés en trois catégories : les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes. Ce chapitre sera dédié aux tufs calcaires notamment leur définition ainsi que leur genèse.

1.3. Répartition dans le monde

Les encroûtements calcaires sont repartis partout dans le monde (figure 1.1), on trouve ces formations dans les régions plates à climat aride et semi-aride, favorables à leur formation. On les recense notamment :

En Europe : les encroûtements calcaires sont peu abondants sauf dans certaines régions méditerranéennes comme l'Espagne.

En Amérique : ce sont les hautes plaines des Etats-Unies allant du Texas à la Californie, au Mexique et en Argentine centrale.

Au Moyen-Orient : on rencontre les encroûtements calcaires au Liban, en Syrie, en Jordanie dans les pays du Golfe Persique et en Inde dans les régions de Delhi et de New Delhi.

En Australie : on trouve les encroûtements calcaires dans les plaines littorales.

En Afrique : ce sont les «Hamada», haut plateaux de l'Algérie, la plaine de Djefara et le bassin de Ben Gazi en Libye, les dépressions du Nord du Kenya, les steppes de la Tanzanie, les plateaux de la Somalie, les vallées du Botswana et d'Afrique du Sud, les zones sèches de Madagascar et du Mozambique, la Namibie et l'Angola.

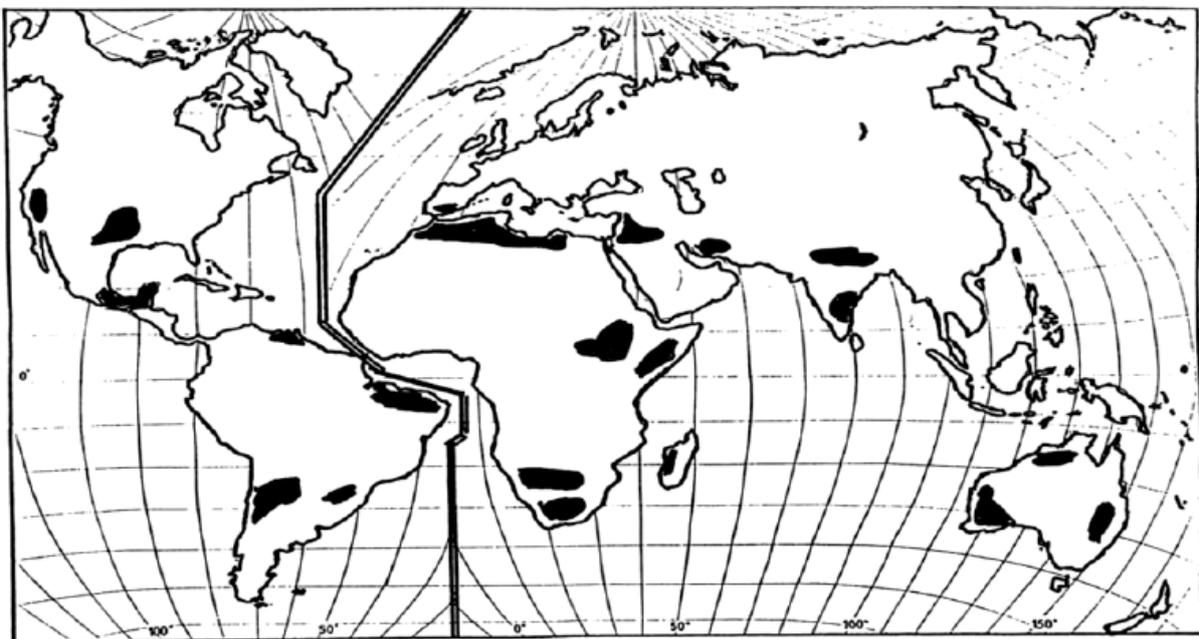


Figure 1.1 : Répartition des encroûtements calcaires dans le monde (Colombier,1988).

1.4. Extension géographique des encroûtements calcaires en Algérie

La carte de J.H. Durand, cité par [Alloul, 1981], montre que les encroûtements calcaires occupent les zones climatiques II et III, comme indiqué sur la figure 1.2. Ils existent néanmoins en zone I à l'état peu différencié et en zone IV (exemple Timimoune). Ils se trouvent rarement en altitude. Ils sont présents dans les bassins relativement plats irrigués par les eaux de ruissellement provenant des massifs calcaires limitrophes. Ils couvrent approximativement une superficie de 300 000 km² en Algérie, [Horta, 1979].

En effet, il existe 26 unités de production de tufs réparties sur 14 wilayas (El oued, Mostaganem, Tiaret, Chlef...). La production de tuf pour l'année 2007 a atteint une quantité de 1 729 069 m³. Ceci représente approximativement 30 % de la production de sable dans notre pays, [Rap Mines, 2009].

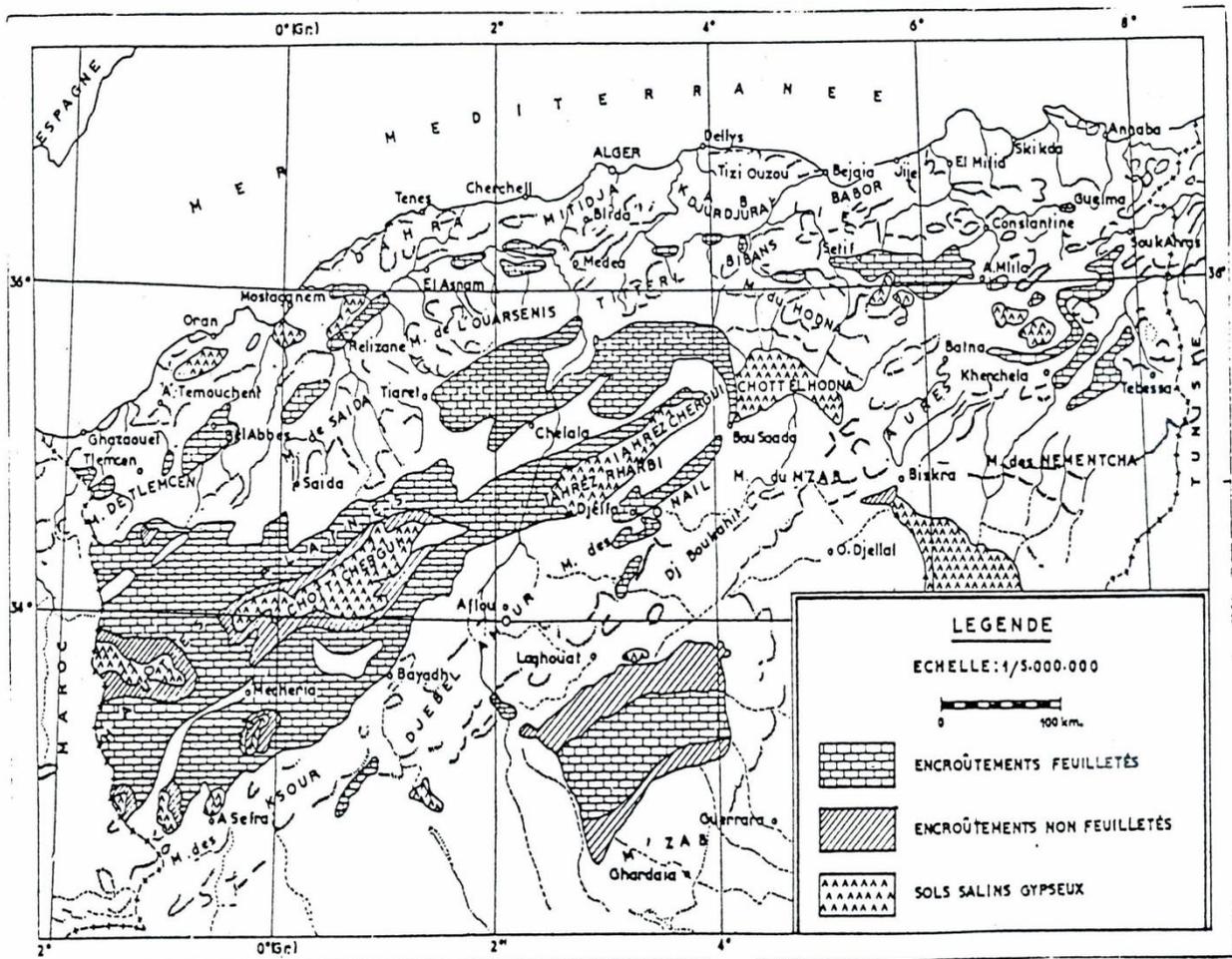


Figure 1.2 : Distribution des encroûtements calcaires en Algérie d'après J.H. Durand, 1959 cité par [Alloul, 1981]

1.5. Formation géologique des encroûtements calcaires

1.5.1. Hypothèses de formation d'après différents pédologues

La genèse des encroûtements calcaires est une question qui est en débat entre les spécialistes (géologues et pédologues) depuis plus d'un siècle et demi. Les pédologues ont été les premiers à étudier « les croûtes calcaires » en Algérie du fait que ses immenses superficies enrichies en calcaires posaient problème aux agriculteurs qui devaient retirer cette carapace pour labourer leurs champs, [Horta, 1979].

La « croûte » a été décrite pour la première fois par Renou en 1848, cité par [Horta, 1979] et [Alloul, 1981,] comme étant « un enduit de surface qui recouvre tous les terrains sans distinction, surtout les terrains d'eau douce et les poudingues et qui suit toutes les ondulations de la surface, il n'a rien de géologique et les mécanismes de sa formation me paraissent difficiles jusqu'à présent à bien expliquer ». Par la suite en 1852, le géologue Ludovic Ville, cité par [Horta, 1979], l'avait décrit comme « un calcaire terreux qui recouvre une grande partie de l'Algérie comme d'un immense linceul blanc ».

Beaucoup d'hypothèses de formation du tuf se sont succédées sans pour autant fixer clairement le sens du mot « tuf » ou « encroûtement calcaire » ni donner une définition nette. Plus tard en 1884, A. Pomel, cité par [Horta, 1979], essaya d'expliquer la formation de cette carapace qui est présente sur beaucoup de terrains dont les parties tendres et friables sont ainsi cimentées en une roche dure et résistante pouvant même servir à l'empierrement des routes. Il formula l'hypothèse d'après laquelle « les encroûtements calcaires sont dus à l'évaporation des eaux qui remontent à la surface par capillarité ».

En 1952 en Algérie, J.H Durand, cité par [Colombier, 1988], a souligné le rôle des phénomènes sédimentaires en milieu lacustre. Cette hypothèse est retenue et considérée comme la plus plausible et recueille actuellement l'assentiment de la plupart des spécialistes.

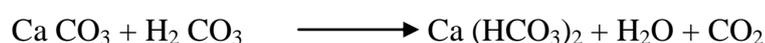
Les questions posées lors de l'étude de formation des encroûtements calcaires sont :

- la provenance du calcaire ;
- son transport ;
- comment s'est-il redéposé et mis en place ?

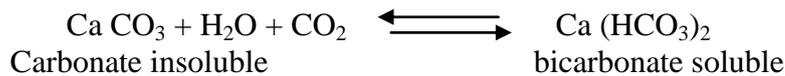
Quelques réponses à ces questions sont exposées dans les sections ci-après.

1.5.2. Processus chimique

Provenance et transport du calcaire : le calcaire provient des massifs calcaires. Dans l'eau pure au contact de l'air, la solubilité du carbonate de calcium CaCO_3 dépend de la teneur de l'eau en anhydride carbonique dissous. Cette teneur diminue lorsque la température croît et augmente lorsque la température décroît : CaCO_3 se dissoudra pour de faibles températures et précipitera si la température s'élève. On résume ces phénomènes par les équations suivantes :



Soit l'équilibre



L'équilibre chimique ci-dessus est déplacé vers la droite en hiver : l'eau de pluie froide, enrichie en CO₂ atmosphérique, attaque les calcaires. Les carbonates solubilisés sont drainés vers les nappes phréatiques des plaines. En été, cet équilibre chimique est déplacé vers la gauche : les carbonates des nappes précipitent dans les sols. Pour F.Netterberg (1969), cité par [Ruellan, 1967], la végétation et l'évapotranspiration en saison sèche jouent un rôle primordial dans l'encroûtement des sols. Pour que cet encroûtement puisse se développer lentement, il faut que les apports d'eau en hiver soient suffisamment faibles et incapables de produire le lessivage du calcaire du sol des plaines. Sous un climat humide, le lessivage l'emporterait et les carbonates aboutiraient dans la mer ». Concernant la dissolution des calcaires, les organismes vivants jouent aussi un rôle important. Par les sécrétions acides des racines, par leur rejet de dioxyde de carbone dans les eaux de ruissellement, ils contribuent à l'acidité des eaux qui attaquent les calcaires qui affleurent.

En conclusion, la formation des encroûtements calcaires correspond à certaines conditions climatiques critiques : climat régnant dans les zones arides et semi-arides.

Dépôt du calcaire : Le calcaire dissout par l'eau précipite à différents niveaux de son transport. Dès que la température augmente, la libération du CaCO₃ s'effectue dans les sols. A partir du moment où le calcaire est déposé (décantation ou évaporation), des phénomènes qualifiés de pédologiques transforment progressivement les différents horizons des sols. L'évolution finale est l'encroûtement mûr, [Ruellan, 1967].

1.5.3. Facteurs de formation

Le processus de formation des tufs est spécifique aux régions arides et semi-arides. Certains facteurs, notamment le climat et la topographie, ont une influence prépondérante sur ce processus.

Climat : Le climat agit par la combinaison de la température et du bilan hydrique. En effet, pour de basses températures la solubilité des carbonates augmente tandis que la précipitation est favorisée par une température élevée de l'eau (de 25° à 30°). Par ailleurs, l'eau chargée en

CO₂ est nécessaire pour la dissolution des carbonates. La quantité d'eau doit être capable de solubiliser les carbonates sans produire le lessivage des calcaires vers des bassins marins. D'une façon générale le climat humide provoque un lessivage de la surface ; tandis qu'un climat comportant aussi bien des périodes sèches et chaudes conduit au contraire à des dépôts des carbonates, [Boukezzi, 1997], [Ben Dhia, 1998].

Le climat du nord de l'Algérie est un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers relativement froids et pluvieux. La carte pluviométrique de l'Algérie (figure 1.3) montre que la pluviométrie s'étale entre les zones côtières arrosées (hauteur de pluie annuelle $H > 600$ mm) et les zones sahariennes arides (hauteur de pluie annuelle $H < 100$ mm). Les différentes zones sont:

Zone I : Méditerranéenne humide $H \geq 600$ mm

Zone II : Méditerranéenne sub-humide $350 \leq H < 600$ mm

Zone III : Semi-aride ou steppique $100 \leq H < 350$

Zone IV : Aride ou désertique $H < 100$

Où H désigne la hauteur moyenne des précipitations annuelles.

Cette zonalité est dirigée d'est en ouest par le relief, mais l'altitude et certains couloirs à microclimat la compliquent. Les encroûtements calcaires liés à la subdivision en zones climatiques, occupent essentiellement les zones climatiques II et III, néanmoins ils existent aussi en zones I et IV, [Horta, 1979].

Topographie : La topographie influe sur le processus de formation des tufs. Une zone plate favorise l'accumulation d'eau, tandis qu'une zone à forte pente favorise le ruissellement. Les croûtes calcaires se trouvent généralement dans des zones à faibles pentes. Le relief de l'Algérie est caractérisé par des chaînes de l'Atlas Tellien et Saharien orientées d'est en ouest séparées par des dépressions. Plus au Sud s'étend la plate-forme saharienne. Les tufs calcaires occupent les bassins plats irrigués par des eaux de ruissellement des massifs calcaires, [Alloul, 1981], [Horta, 1979].

Temps : La formation des encroûtements calcaires est un phénomène lent qui s'est poursuivi sur des périodes longues à l'échelle géologique, dont l'unité est au moins de l'ordre de milliers d'années. Les croûtes les plus jeunes ont plusieurs centaines de milliers d'années.

Elles sont toutes du quaternaire, ère qui a débuté il y a deux à trois millions d'années, [Ben Dhia, 1998].

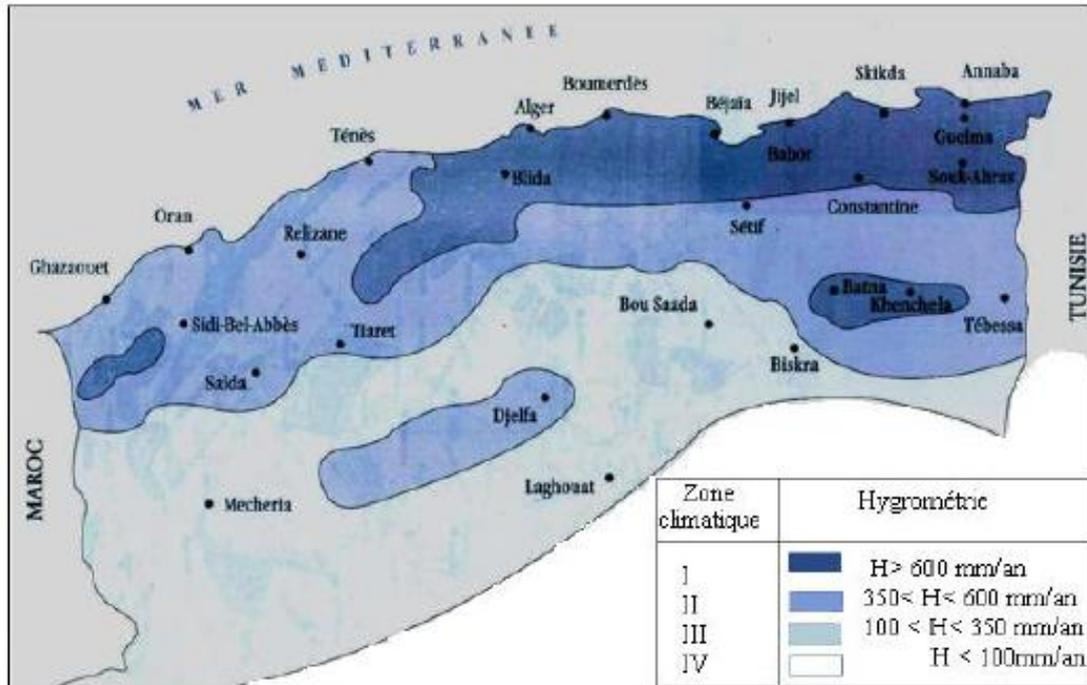


Figure 1.3 : Carte pluviométrique de l'Algérie d'après J.Dubief, 1950 cité par [Horta, 1979]

1.5.4. Classification

Une classification pédologique basée sur l'importance du calcaire dans sa distribution verticale dans un encroûtement a été proposée par [Ruellan, 1967]. Plus d'intérêt est porté aux encroûtements mûrs susceptibles de produire des matériaux utilisables en construction. La figure 1.4 représente un schéma type d'un encroûtement mûr avec ses différents horizons, [Ruellan, 1967]. On peut distinguer trois (03) horizons du haut vers le bas (figure 1.4).

Premier horizon A: Pauvre en calcaire, il constitue plutôt la couche de terre végétale contenant de la matière organique, dont l'épaisseur moyenne est de 30 à 50 cm. Dans cette couche les solutions sont concentrées à cause des racines qui absorbent l'eau mais le calcaire ne précipite pas en grande quantité à cause de l'activité biologique qui alimente le milieu en CO_2 .

Deuxième horizon Bca : Il constitue l'horizon d'accumulation proprement dit et le corps même de l'encroûtement et comprend le plus souvent :

- une dalle compacte, dure, à forte teneur en calcaire (40 à 80 %) et dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de centimètres;
- une croûte constituée par une superposition de feuillets de dureté plus faible que celle de la dalle. Son épaisseur peut atteindre les deux mètres. La différenciation entre la croûte et la dalle n'est pas toujours évidente ;
- une zone nodulaire. Il s'agit de nodules calcaires durs pris dans une gangue calcaire plus ou moins pulvérulente.

Troisième horizon C : Cet horizon constitue le matériau d'origine dans lequel on rencontre cependant quelques nodules. Le passage entre les horizons A et Bca est assez net grâce au changement de couleur surtout lorsqu'il y a une croûte ou dalle au sommet Bca. Par contre l'horizon Bca passe très graduellement à l'horizon C sans changement notable de couleur, le seul indice observable étant la disparition de nodules.

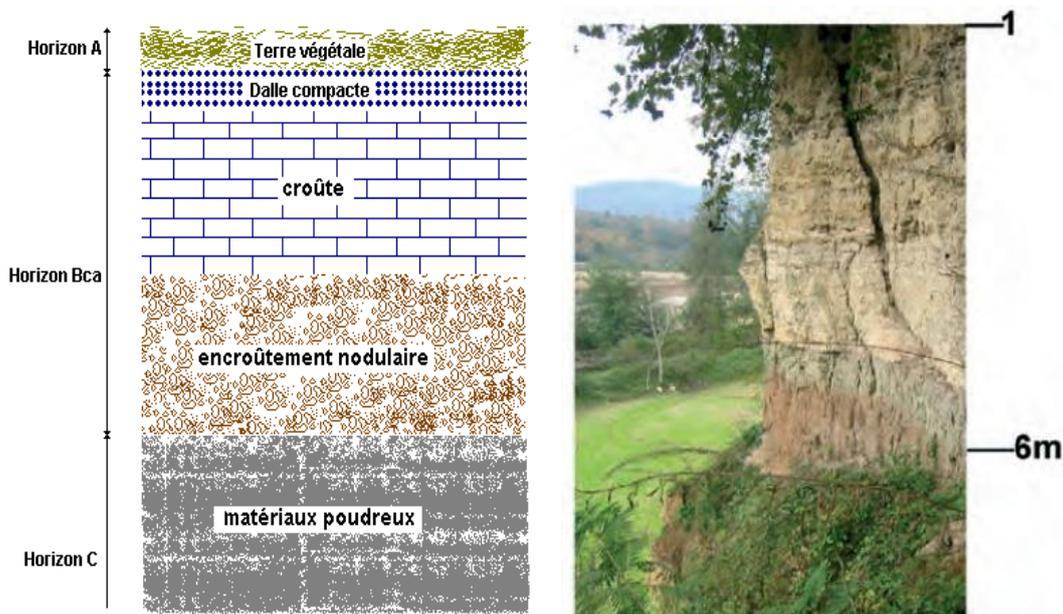


Figure 1.4 : Encroûtement mûr, [Colombier, 1988]

D'autre part, on donnera dans la figure 1.5 une répartition verticale du calcaire dans les cas d'un sol à encroûtement non feuilleté et d'un sol à encroûtement feuilleté, [Colombier, 1988].

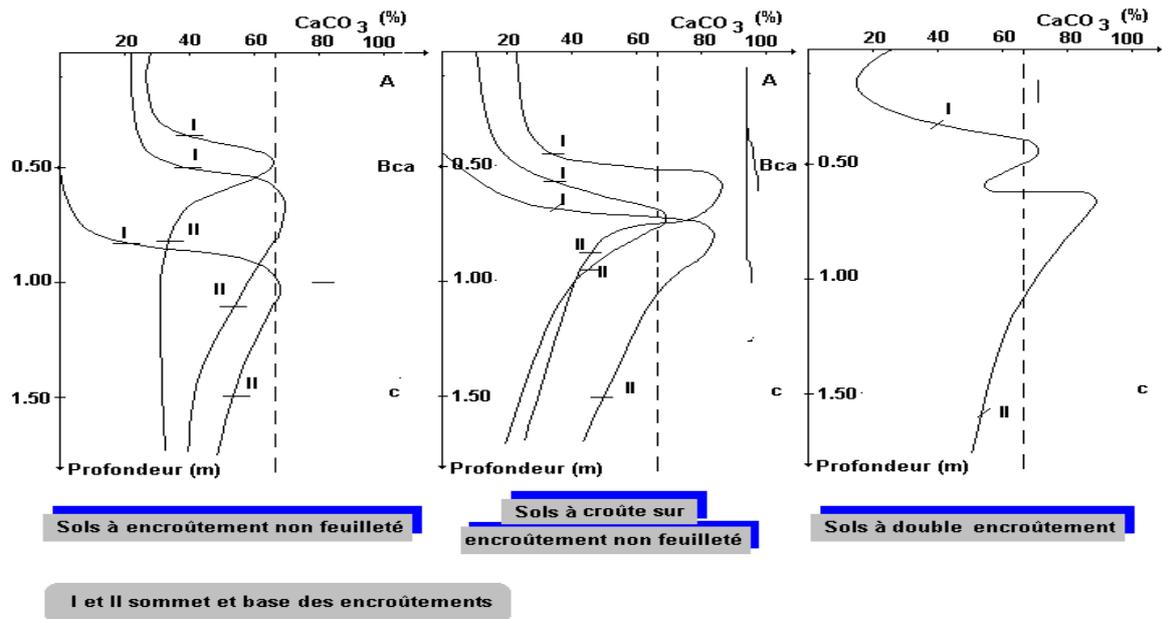


Figure 1.5 : Quelques exemples de profils calcaires de sols différenciés d'après [Ruellan, 1967]

Le tableau 1.1 résume les différentes classes des encroûtements calcaires avec leurs caractéristiques.

Tableau 1.1: Classification des encroûtements calcaires d'après [Ruellan, 1967]

Dénomination		Description	CaCO ₃ (%)	Epaisseur	Rapports mutuels
Encroûtements non feuilletés	Encroûtements massifs	Structure massive ou polyédrique	> 60	0.3 à 2.0 m le plus souvent	Sous les encroûtements non Feuilletés, il y a toujours des amas friables avec ou sans nodules.
	Encroûtements Nodulaires	Structure nodulaire et polyédrique			
Encroûtements feuilletés	Croûtes sensu Strictu	Feuillets superposés et discontinus d'encroûtements massifs ou nodulaires d'épaisseur millimétrique à centimétrique croissant du bas vers le haut.	> 70	Quelques centimètres à un mètre	Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes et peuvent remplacer entièrement celles-ci. Des pellicules rubanées sont presque toujours associées à la dalle compacte dont elles tapissent la surface supérieure et les fissures
	Dalles compactes	Feuillets de croûte pétrifiés, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres			

On distingue donc selon cette classification

a- Les encroûtements non feuilletés

- Encroûtements massifs d'aspect crayeux et de couleur homogène,
- Encroûtements nodulaires : ce sont des nodules durs pris dans une gangue calcaire.

b– Les encroûtements feuilletés correspondant à la coupe de la figure 1.4 pour un encroûtement mûr.

b) Age des encroûtements calcaires

Le calcaire se concentre dans un premier temps de manière discontinue sous forme d'amas friables et de nodules durs. Au fur et à mesure du dépôt, la teneur en carbonates du sol s'élève et la concentration devient continue et masque la couleur primitive du sol, à partir de ce stade se produisent ce que Ruellan appelle les phénomènes pédologiques qui progressivement transforment les différents horizons des sols [Améraoui, 2002]. L'évolution finale est l'encroûtement mûr (Figure 1.4).

D'après Ruellan les croûtes les plus jeunes sont de 15 à 20.000 ans d'âge, alors que l'encroûtement mûr où la dalle compacte est présente, plusieurs centaines de milliers d'années. Ce sont donc des formations Quaternaires plus précisément d'âge Villafranchien à l'actuel. En Algérie, les encroûtements des zones à climat semi-aride sont résistants et comportent des croûtes plus ou moins feuilletées et des dalles compactes très épaisses. Les encroûtements Salétiens sont très souvent développés [Horta, 1979]. Le tableau 1.2 résume les différentes formations et leurs âges respectifs. Les encroûtements massifs sont d'âge Moulouyen à Salétien. Cette période était caractérisée par des successions de périodes pluviales et périodes sèches.

Tableau 1.2 : Chronologie des différentes formations en Maghreb (Alloul, 1981)

			Niveaux eustatiques	Etages continentaux (pluviaux)	encroûtements
0.00	Holocène	Actuel récent	Mellahien supérieur	Gharbien	Accumulations diffusées
			Mellahien inférieur	Soltanien	Accumulations discontinues
200.000 100.000	Pléistocène	Supérieur	Ouljien Monastirien	Tensifien	Carapaces fréquentes
			Anflatién	Amirien	Carapaces rares
		Moyen	Maarifien	Salétien	Carapaces assez développées
		Ancien		Moulouyen Villafranchien	Carapaces puissantes avec dalle
2.000.000 3.000.000					

1.6. Caractéristiques des tufs calcaires

Les tufs sont des matériaux légers ; leur masse volumique est inférieure à 2 t/m^3 (avoisine 1.8 t/m^3). De plus, ils sont très tendres, caractérisés par un coefficient Los Angeles supérieur à 60. Si l'on ne considère que leur granularité et friabilité, ils sont hors des critères habituels de choix des matériaux en construction routière et même celles des granulats pour béton hydraulique, [Ben Dhia, 1998].

1.6.1. Granularité

La granularité est la distribution par dimension des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique est la méthode d'essai qui a pour but de déterminer cette granularité.

Les tufs calcaires se présentent en 0/D où D est la plus grande dimension des granulats et qui varie entre 20 et 100 mm. Compte tenu des formes très variables sous lesquelles ils peuvent se présenter (pulvérulents, nodulaires ou croûtes), leur granularité est très variée. Ils sont très riches en fines. En effet, pour les tufs ayant un D_{\max} de 20 mm (0/20), la fraction des fines ($< 63 \mu\text{m}$) peut atteindre des valeurs de 10 à 30 %, ce qui n'est pas négligeable, [Colombier, 1988].

1.6.2. Caractérisation de la résistance à la fragmentation et à l'usure

L'essai Los Angeles estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements. Il consiste à placer un poids défini d'une classe granulaire dans un tambour rotatif contenant un certain nombre de boulets. Les fines produites de cet essai sont récupérées pour calculer le coefficient Los Angeles.

Le coefficient Los Angeles mesuré sur les matériaux d'encroûtements varie entre 30 pour les dalles les plus compactes et 70 à 80 pour les croûtes les plus friables. Au-delà de ces valeurs l'essai est sans intérêt. Il est non mesurable pour les encroûtements friables. Ces derniers, sont ceux qui nous intéressent le plus du fait qu'ils se rapprochent plus des sables que des gravillons, [Colombier, 1988].

1.6.3. Propreté et teneur en éléments fins (équivalent de sable)

L'essai équivalent de sable ES permet d'estimer la propreté des sables. Il consiste à immerger un poids défini de sable dans une solution flocculante et évaluer le rapport entre la hauteur du dépôt de sable visible et la hauteur totale y compris le flocculat.

Cet essai n'a que peu de signification lorsqu'il est réalisé sur la totalité de la fraction 0/5 mm du matériau. La teneur en éléments fins de cette fraction peut en effet varier de 10 à 80 %, ce qui influence considérablement la valeur de ES et renseigne peu sur la qualité des fines. L'essai équivalent de sable à 10 % de fines s'effectue sur un échantillon dont on a ramené la teneur en fines à 10 %. La fraction sable des matériaux d'encroûtement possède une teneur en fines beaucoup trop importante pour que l'ES à 10 % de fines leur soit applicable. Lorsque l'ES a cependant été mesuré sur la fraction sable de ce matériau, les valeurs annoncées varient entre 10 et 60, [Colombier, 1988].

1.6.4. Nocivité des fines (essai au bleu de méthylène)

L'essai au bleu de méthylène a pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse. Il est le mieux adapté pour évaluer l'activité des fines et déterminer la présence d'argiles plastiques. Dans cet essai, il est déterminé la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-moléculaire les particules fines étudiées. Le résultat de l'essai est exprimé en grammes de bleu par kilogramme de fraction 0/2 mm. Les quelques essais réalisés sur les tufs indiquent des valeurs comprises entre 0.2 et 1, [Colombier, 1988]. Il est à noter que ce seuil est acceptable pour les bétons hydrauliques.

1.7. Utilisation des tufs Calcaires

1.7.1. Utilisation en technique routière

Les tufs calcaires sont utilisés en technique routière dans de nombreux pays. Ils servent en assises de chaussées, soit en couche de fondation, couche de base ou en accotement. Chaque pays dispose de règles pour leur utilisation. Pour un même objectif, les spécifications peuvent être différentes par le type de caractéristiques retenues et par le niveau des exigences. En Algérie, les tufs sont classés par ordre de friabilité croissante selon leur coefficient Los Angeles (LA), soit :

- ❖ Tuf à squelette LA < 35
- ❖ Tuf friable 35 < LA < 50
- ❖ Tuf pulvérulent 50 < LA

La teneur en carbonate de calcium doit être supérieure à 70%. Il y a aussi la considération de l'indice de portance, indice de plasticité et la granularité. Globalement, les tufs recommandés en couches de chaussées sont les tufs à squelette, [Colombier, 1988 ; Alloul, 1981 ; Strouillou et Alloul, 1984].

Dans cette étude, il est envisagé d'élargir leur utilisation au béton hydraulique en tant que sable.

1.7.1.1. Stabilisation de tuf par des liants hydrauliques

Le recours au traitement des tufs d'encroûtements a déjà été envisagé. Il peut cibler soit une amélioration de la cohésion et/ou de l'angle de frottement interne, soit une amélioration des caractéristiques de mise en œuvre, soit une insensibilisation à l'eau. Pour une utilisation des tufs en corps de chaussée, sous un fort trafic, la solution est généralement apportée par la stabilisation à l'aide de liants hydrauliques [Domec et Alloul, 1980 ; Colombier, 1988; Boukezzi, 1997 ; Hachichi, 2000 ; Cherrak, 2003].

Le traitement aux liants hydrauliques peut apporter une solution aux problèmes posés par ces sols, à la fois en modifiant leur nature et en améliorant leur état. Il permet d'utiliser des sols impropres au réemploi ou de qualité médiocre dans leur état naturel, et d'exécuter les terrassements dans des conditions normales de travail tout en diminuant la susceptibilité du chantier aux intempéries. L'action des liants hydrauliques est principalement due à la prise hydraulique qui produit la cimentation des éléments granulaires présents dans le sol [Serikma, 2013].

La nature calcaire des tufs s'accorde bien, d'autre part, avec l'emploi des liants hydrauliques. Il faut par contre tenir compte de la porosité des tufs et de leur capacité d'absorption d'eau et humidifier le mélange en conséquence [Ben Dhia, 1998 ; Cherrak, 2003]. Une telle solution a été étudiée et utilisée avec succès en Tunisie pour le renforcement de la Route Nationale 1 (GP1) [Hamrouni, 1975]. Un sable de plage traité au laitier granulé a été corrigé par 15% d'un tuf 0/5 mm. L'adjonction de tuf améliore très fortement les performances du sable laitier, puisque, dans le cas de la GP1, la résistance après 28 jours de prise était multipliée par 3 et que la densité était augmentée de 6 % [Colombier, 1988]. Cette solution paraît donc intéressante chaque fois qu'un sable traité par un liant hydraulique est envisagé et que l'on

dispose à proximité de gisements de tuf calcaire. Dans cette technique, le tuf n'intervient que comme un constituant secondaire, mais son rôle est important.

1.7.1.2. Mélange de tuf avec des granulats

Par ailleurs, et en raison de la forte teneur en fines des tufs d'encroûtement, une autre technique a été élaborée et développée depuis plus de 30 ans. Elle consiste en l'association du tuf avec d'autres matériaux, traités ou non traités, riches en gros éléments, mais dépourvus totalement de fines (graves ou sables) [Hamrouni, 1975 ; Colombier, 1988]. Cette technique de mélange de matériaux semble ouvrir une autre voie. Elle peut porter soit sur une correction granulaire, soit sur une amélioration des caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un matériau donné.

Les tufs, notamment les plus tendres, ont naturellement une courbe granulométrique discontinue. Leur teneur en fines est élevée et ils comportent peu ou pas de squelette. Certaines graves naturelles sont, au contraire, riches en gros éléments, mais totalement dépourvues de fines. Par ailleurs, certains sables naturels éoliens ou alluvionnaires et même dunaires ont des courbes granulométriques très homométriques et sont eux aussi dépourvus de fines. L'association de tuf avec ces graves ou sables [Cherrak, 2008 ; Morsli, 2013] paraît donc tout à fait intéressante lorsque l'on cherche une courbe granulométrique continue et suffisamment riche en fines pour obtenir un matériau à faible pourcentage de vides après compactage. Cette technique a été élaborée et développée depuis plus de 30 ans. Elle est à rapprocher de la litho-stabilisation qui est utilisée avec succès pour le traitement des latérites.

1.7.1.3. Tufs – Sable de dune

Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié [Chauvin, 1987]. Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. Ben-Dhia (1998) dans une tentative de valorisation du sable de dune, a mélangé ce dernier, à différents taux, avec divers matériaux: grave naturelle, tuf calcaire, tuf gypseux et sol argileux et a conclu que l'incorporation du sable de dune améliore la portance des matériaux, le poids volumique est aussi amélioré lorsque la teneur en sable augmente jusqu'à 30% et la plasticité diminue au profit d'une meilleure propreté.

En Algérie, vu l'abondance du sable de dune, l'idée de l'association de tuf avec le sable de dune au laboratoire paraît très intéressante [Cherrak, 2003 ; Morsli, 2007]. L'étude a porté sur l'effet de l'incorporation d'un sable de dune sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un tuf calcaire de la région de Bechar. L'objectif était de tester les possibilités d'amélioration des caractéristiques de ce tuf par une technique de stabilisation économique permettant de valoriser à la fois le sable de dune et le tuf calcaire pulvérulent. Les résultats ont montré qu'un ajout de 25% de sable de dune a permis d'atteindre un gain de l'ordre de 25 % en eau de compactage, de 17% en densité sèche et de 30% en portance. Concernant la résistance à la compression, elle demeure comparable à celle du matériau sans ajout.

1.7.1.4. Tuf sable de concassage

Des recherches pour montrer la possibilité d'amélioration des caractéristiques mécaniques d'un tuf par une technique de stabilisation économique à l'aide d'un déchet de carrière (sable de calcaire) ont été entreprises par Goual en 2012. Les indices de portance ont montré l'existence d'une formulation optimale tuf-sable calcaire, correspondant à un ajout d'un pourcentage de sable calcaire de 30% et 40%, respectivement pour les indices immédiats et après 4 jours d'imbibition. Au-delà de ces pourcentages, les indices de portance baissent tout en gardant des valeurs supérieures ou égales à celles du tuf seul. Par ailleurs, les essais de résistance à la compression simple ont montré que la résistance optimale est obtenue avec un ajout de 20% de sable calcaire. Cette résistance a été retenue pour évaluer la cohésion, élément incontournable dans les critères de choix des matériaux utilisés en technique routière saharienne. Cette cohésion disparaît quasi totalement après saturation du matériau. Cette formulation composée de 80% tuf et de 20% sable calcaire est retenue comme mélange optimal. Le point faible de cette formulation réside dans l'effondrement de sa résistance après immersion. Pour compenser ce défaut, un traitement avec un faible pourcentage de liant hydraulique s'est avéré nécessaire. Ce traitement au ciment a montré une amélioration notable (plus du double) des performances mécaniques du mélange optimisé. Globalement, les résultats obtenus mettent en évidence la possibilité de valorisation des matériaux locaux à base de tuf et de déchets de carrière (sable calcaire) pour la conception de corps de chaussées dans les zones arides sahariennes [Goual₁ et Goual₂, 2012].

1.7.1.5. Confection de bloc pour construction

Le tuf calcaire est un matériau utilisé pour la confection de blocs de construction avec la technique de la terre stabilisé BTS. Cette technique a été utilisée dans la construction depuis l'origine des civilisations. Les anciennes cités de Mésopotamie, qui ont été édifiées il y a près de 8000 ans, étaient construites en briques de terre stabilisées. Le tuf y est modelé, tassé, compressé, stabilisé avec des liants disponibles sur place. La construction en BTS peut devenir une alternative de construction viable, dans la mesure où elle dispose d'une base scientifique et technique comparable à celle des autres matériaux. Ce type de construction à base de matériaux locaux est toujours en usage même dans les pays industrialisés réalisé avec des techniques modernisées. Ces constructions répondent à des critères de confort (thermique et acoustique) que le béton peut parfois difficilement offrir, [Martin, 1998 ; Zami, 2008].

1.7.2. Utilisation du tuf comme intrant de substitution dans le béton : état des connaissances

Il y a peu ou pas d'études traitant des tufs calcaires dans le béton de structure. Seule leur application avec du ciment comme stabilisant est envisagée pour la réalisation de chaussées dans certains pays comme l'Argentine et la Tunisie, [Colombier, 1988 ; Ben Dhia, 1998]. Pourtant, le ciment présente une compatibilité parfaite avec le tuf grâce à sa nature calcaire. A noter cependant que les tufs calcaires constituent un matériau de base très convoitée moyennant un stabilisant pour la confection de Blocs de Terre Stabilisée (BTS), [Malier, 2006 ; Zami, 2008]. Avec l'application de simples mesures de protection contre les remontées capillaires et les pluies, il était tout à fait possible de réaliser des constructions économiques ayant une bonne durabilité, [Martin, 1998].

Cette lacune dans l'étude de ce matériau abondant en Algérie a incité à entreprendre les investigations sur ce sujet en se référant à des études similaires faites sur divers matériaux de substitution, entre autres les sables de concassage et de dunes. Ces éléments de substitution présentent un intérêt économique et écologique précisément dans le cas de sable de concassage, considéré à l'origine comme déchet de l'abattage des roches massives dans les carrières. L'introduction des sables de concassages dans le béton s'est vite répandue, vu leur adaptation à la confection des bétons, la seule contrainte rencontrée est celle relative à leur taux de fines qui a été limité à 15 % dans la globalité.

Il est rappelé cependant que l'introduction d'ajout de nature calcaire dans le béton a fait l'objet d'une grande réticence en raison des préjugés entachant ces additions, notamment leur solubilité et leur forte réactivité avec les acides pouvant porter préjudice à la durabilité des ouvrages. Néanmoins, bon nombre de pays européens (France, Belgique, Suisse) possédant des gisements de matériaux calcaires en abondance les ont tout de même utilisés pour combler les déficits en matériaux de construction. A la lumière de cette expérience européenne de plus d'un quart de siècle, l'utilisation des ajouts de nature calcaire s'est élargie à d'autres pays de la planète où ce type de matériaux était portant complètement prohibé. Ainsi, les normes canadiennes relatives aux bétons et ciments mises à jour (tolérance augmentée sur le taux de fines calcaires) ont été incluses dans le Code National du Bâtiment de Canada en 2010. A l'heure actuelle, l'utilisation du matériau en question a été approuvée en Colombie, en Bretagne, au Québec et en Nouvelle-Écosse [www.cement.ca].

Cette évolution est l'aboutissement de plusieurs recherches approfondies sur le thème dont les constatations essentielles sont leur rôle d'accélération de l'hydratation bénéfique pour les performances mécaniques, et l'incertitude qui s'est installée sur leur fragilité en milieu agressif. Les études menées au Canada réalisées par des entreprises et des universités, ont confirmé la possibilité de cette utilisation pour l'atteinte de résistances et des durabilités similaires (3 à 20% d'ajout). En raison de résultats mitigés rapportés dans la littérature scientifique, ils ont été juste prohibés pour les bétons exposés au sulfate [Irassar, 2009]. Cette restriction est attribuable aux inquiétudes soulevées par des informations contradictoires des résultats et à celles concernant la forme thaumasite d'attaque au sulfate susceptible de se produire en cas de basses températures.

Le tuf calcaire étant un matériau semblable au sable de concassage de par sa nature et le taux de fines élevé qu'il renferme, l'idée d'envisager son utilisation comme matériau de substitution a émergé.

1.7.3. Perspective d'utilisation du tuf calcaire dans le béton

L'Algérie a connu un développement considérable dans le domaine de la construction de bâtiments et des travaux publics durant la dernière décennie, ceci a engendré un accroissement important de la consommation de sable. Cela a conduit à l'exploitation anarchique et illicite des sables alluvionnaires et marins. L'utilisation du tuf calcaire dans le béton peut constituer une alternative palliant à ce problème de raréfaction des sables. Ceci est justifié par la nature calcaire des tufs qui s'accorde bien avec l'emploi des liants hydrauliques,

comme stipulé précédemment. Cependant, ces tufs calcaires contiennent un pourcentage élevé de fines qui dépasse les exigences des normes en vigueur. Cet excès de fines induirait une augmentation de l'eau de gâchage pour une même ouvrabilité, qui entraînerait une réduction des performances mécaniques du béton (chute de résistance). Le contournement de ce problème est possible par l'utilisation de moyen adéquat comme l'introduction d'un adjuvant par exemple ou la correction de cette fraction fine. Il faut tenir compte aussi de la porosité des tufs due à leur nature spongieuse et de leur capacité d'absorption d'eau. Cela accentuera la demande en eau de gâchage. Par ailleurs, ils peuvent très bien jouer le rôle de sable correcteur aux sables naturels dépourvus de fines. Cette éventualité sera développée dans la prochaine étape. La possibilité d'utilisation des tufs calcaires dans le béton doit se faire par l'élaboration d'une étude approfondie et une mise au point de méthodes adaptées aux caractéristiques de ce matériau.

Par ailleurs, il paraît opportun d'exploiter l'utilisation des tufs calcaires dans la formulation du béton auto-plaçant (BAP) pour tirer profit de leurs taux de fines élevés. En effet, les BAP nécessitent dans leurs formulations un apport en fines et en pâte supérieur à ce qui est usuellement utilisé pour les bétons ordinaires. Pour cette partie, le recours à la méthode des plans d'expériences est envisagé pour la formulation.

Pour rappel, les sables, pour être utilisés dans le béton, doivent répondre à un certain nombre de spécifications fixées par la norme NA 5043, portant sur « granulats : éléments de définition, conformité et codification », et l'Instruction Interministérielle du 25/02/2007, [NA 5043 ; Instruction, 2007].

1.8. Conclusion

Bien connu des géologues, les encroûtements ou croutes calcaires constituent une ressource en matériau particulièrement intéressante pour de nombreux pays à climat aride ou subaride. Les matériaux d'encroûtements calcaires sont très largement utilisés en technique routière dans un certain nombre de pays : Algérie, Tunisie, Afrique du Sud, Argentine. Lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, ils ont un Comportement bien meilleur que le laisseraient supposer leurs caractéristiques géotechniques, en comparaison aux spécifications usuelles. La technique du traitement des tufs à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est très satisfaisante. Néanmoins, peu ou pas d'études sont élaborées pour leur valorisation en tant que substitut dans le béton afin d'atténuer la tension sur le sable qui est un matériau fortement sollicité dans le domaine de la construction. La disponibilité des stocks reste très insuffisante par rapport à

une demande très importante. Cette forte demande a engendré le pillage effréné des sables sur les plages du littoral et les lits d'oueds, qui ont pour conséquence une grave atteinte à l'écosystème dont la dégradation affecterait irréparablement l'équilibre de l'environnement.

En Algérie, les encroûtements calcaires constituent une source naturelle abondante pouvant être employée dans le béton. Il a été recensé plusieurs définitions du mot tuf dans la littérature ; mais en résumé ils sont définis comme étant des matériaux de couleur claire composés essentiellement de carbonates de calcium. Concernant leur genèse, les spécialistes débattent sur leur formation depuis plus d'un siècle et demi. On peut retenir, que le rôle des phénomènes sédimentaires en milieu lacustre est à l'origine de leur genèse. Cette hypothèse est considérée comme la plus plausible et qui recueille actuellement l'assentiment de la plupart des spécialistes. Concernant leurs caractéristiques, les tufs calcaires sont des matériaux légers, caractérisés par une masse volumique inférieure à 2 t/m^3 . Leur granularité est très variée et ils sont riches en éléments fins. Cette fraction de fines est de l'ordre de 10 à 30 %. De plus, ils sont considérés comme tendres du fait que leur LA est majoritairement supérieur à 60.

Leur nature calcaire qui s'accorde bien avec le ciment laisse à envisager leur ajout en tant que granulats dans le béton par substitution partielle du sable. La faisabilité de cette substitution et son influence sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton sont étudiées et présentées dans les prochains chapitres.

CHAPITRE II: SABLE POUR BETON

2.1. Introduction

Le sable en tant que granulat, est indispensable à la confection des mortiers et bétons. Globalement, les sables sont définis comme étant des minéraux issus de roches dures et ayant subi, soit un traitement naturel (ex. les sables de rivière), ou bien un traitement artificiel (ex. sable de concassage). Mélangés avec un liant, ces derniers doivent permettre l'obtention de béton de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, de résistance et de durabilité. Pour ce faire, de nombreux paramètres entrent en ligne de compte, soit des paramètres physiques ou mécaniques liés directement à la forme ou à la dureté du sable utilisé. Donc, pour qu'un sable puisse être un bon constituant du béton et jouer convenablement son rôle de « produit de remplissage » ses caractéristiques de granularité, propreté et dureté doivent être appropriées à la destination du béton, ce qui implique le respect de spécifications et des normes en vigueur. Ces spécifications, auxquelles doivent satisfaire les sables, sont précisées dans la nouvelle norme algérienne NA 5043 de 2007 (équivalente à la norme XP P18-545). En réalité, beaucoup de travaux se sont penchés sur la normalisation, la définition, l'origine et l'application des sables [Kettab, 2007 ; Menadi, 2008 ; Béderina, 2005]. Ces références constituent une source d'information détaillée et exhaustive dans ce domaine. Il est à préciser que certaines modifications sur les exigences ont été appliquées sur les granulats à béton de manière générale, suite à l'apparition de nouvelles normes européennes adoptées dans notre pays. Pour cette raison, un rappel des nouvelles exigences est présenté.

A priori, il faut savoir que les granulats destinés à la confection de béton hydraulique sont actuellement classés en plusieurs catégories (A, B, C et D) avec des spécifications particulières pour chacune d'elles. Ces catégories sont définies selon la norme NA 5043 comme suit :

- ❖ La catégorie **A** désigne un béton de qualité doté d'une résistance à la compression $R_c \geq 36$ MPa ;
- ❖ La catégorie **B** désigne un bon béton ;
- ❖ La catégorie **C** désigne un béton courant
- ❖ La catégorie **D** désigne un béton courant où deux caractéristiques sont seulement respectées.

➤ 2.2. Définition et origine des sables

Par définition, on appelle sable, le mélange meuble de grains inférieurs à 4 mm de provenance naturelle ou artificielle [NA 5043]. Il peut être un sable de mer, d'oued ou de concassage. Selon la grosseur de ces grains, il sera distingué les sables fins, moyens ou grossiers.

Les sables peuvent être d'origine naturelle ou artificielle. Les sables naturels se composent essentiellement de sable de rivière, sable de gisement dit de carrière et les sables de dune. Par ailleurs, les sables artificiels peuvent être naturels de formation mais obtenus par concassage de la roche (exemple le sable de concassage) ou bien artificiels par leurs formation et obtention comme le laitier, par exemple.

➤ 2.3. Caractéristiques normatives des sables à béton



➤ 2.3.1. Granularité et classification des grains de sable

La granularité est la distribution par dimension des grains d'un granulat. C'est l'un des termes le plus important à considérer lors de l'établissement d'une formulation d'un béton, notamment la continuité et la régularité de la granularité. L'analyse granulométrique est la méthode d'essai qui a pour but de déterminer cette granularité. Les sables à béton sont caractérisés, du point de vue de leur granularité, par leur dimension D inférieure ou égale à 4 mm, telle que définie dans la norme NA 5113 (équivalente à EN 12620), la valeur spécifiée inférieure du passant à cette dimension est fixée à 85 : passant à $D \geq 85$ %. Aussi par leur teneur en éléments inférieurs à 0.063 mm mesurée par lavage sur tamis de 0.063 mm. La norme précise que le pourcentage maximal de fines est limité à 10 % pour les sables de catégorie A, à 16 % pour ceux des catégories B et C et à 22 % pour ceux de la catégorie D. Leur module de finesse MF, sur lequel nous reviendrons plus loin avec plus de détails, doit être compris entre 1.8 et 3.2. Généralement, la qualité du béton (maniabilité et résistance) justifie l'emploi d'un sable dont la granularité s'inscrit dans le fuseau donné ci-après (tableau 2.1) à titre indicatif [Dreux, 1998] :

A ce fuseau correspond un module de finesse MF compris entre 1.8 et 3.2 mesuré suivant une série de tamis préconisée. Pour assurer une continuité dans la courbe granulométrique, il faut veiller à ce que le pourcentage retenu en masse entre deux tamis successifs de la série 0.125 ; 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 mm n'excédant pas 40 %.

Tableau 2.1 : Fuseau granulaire d'un sable pour béton

Tamis [mm]	Passant [%]	Etendue [%]
0.16	5 à 20	15
0.315	15 à 40	25
0.63	30 à 70	40
1.25	55 à 90	35
2.5	80 à 100	20
4	95 à 100	5

Les sables peuvent être classés d'après leur grosseur en trois catégories suivant le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Classification des sables selon la grosseur de leurs grains [Dreux, 1998]

Appellation	Catégorie	Ouverture des tamis (mm)
Sables	fins	0.08 à 0.315
	moyens	0.315 à 1.25
	gros	1.25 à 4

Les sables à béton doivent ainsi s'insérer dans un fuseau granulométrique précis. Or, toutes ces caractéristiques dépendent en grande partie de l'arrangement et de la taille des grains. Dans les mortiers, les résistances croissent comme la compacité (Féret, 1892 cité par Dreux, 1998). Féret a établi un diagramme triangulaire permettant de déterminer une même compacité pour différents mélanges granulométriques de sable. A chaque compacité correspond une courbe. C'est ainsi que les sables isogranulaires ont un pourcentage de vides important. Seuls les sables bien gradués permettent d'obtenir des compacités suffisantes. Cette spécificité des sables est appréciée avec l'indice de classement et le module de finesse. Ces paramètres sont étroitement liés à l'origine des sables: les sables éoliens, les sables marins et les sables d'oued ont des courbes granulométriques différentes. Une bonne définition de l'origine géologique d'un sable permet de prévoir avec une bonne approximation son fuseau granulométrique.

➤ 2.3.2. Module de finesse des sables

Le module de finesse, introduit par Abrams (1918), permet de caractériser les granulats utilisés pour les mortiers et les bétons. Il est défini comme étant la somme des pourcentages

des refus cumulés, ramenés à l'unité, à partir du tamis de module 23 et suivants : 26, 29, 32... (de trois en trois). En d'autres termes, il est égal au centième de la somme des refus au tamis de : 0.125 ; 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 mm [NA 5113].

L'utilité de cette caractéristique réside dans le fait que l'étude des courbes granulométriques a conduit à délimiter des « fuseaux de granularité » suivant des critères de mise en œuvre (ouvrabilité), d'économie de liant, d'aspect et de résistance. D'où, si le sable a trop d'éléments fins, il est nécessaire d'augmenter le dosage en liant avec tout ce que cela implique comme conséquence économique, mais l'ouvrabilité est améliorée. Par ailleurs, si le sable manque de finesse, le béton obtenu est raide, plus difficile à mettre en œuvre, mais avec une économie de liant. En conclusion, le module de finesse d'un sable destiné à la préparation des bétons courants, doit être compris entre 1.8 et 3.2, comme stipulé précédemment.

➤ 2.3.3. Propreté des sables

Les normes relatives aux granulats, de manière générale, prohibent les impuretés tels que le charbon, le mâchefer, les déchets de bois, les feuilles mortes, les débris végétaux ou plastiques, etc... La teneur acceptée doit être inférieure à 0.1%. Dans le cas précis du béton, il convient surtout d'éviter la présence de la gangue argileuse ou des poussières qui risquent de compromettre l'adhérence avec le liant et par voie de conséquence diminuer la résistance. Pour les sables, la propreté est contrôlée essentiellement par l'essai dit « équivalent de sable » et éventuellement l'essai au bleu appelé aussi essai à la tâche.

Equivalent de sable

L'essai équivalent de sable ES permet d'estimer la propreté des sables, selon un processus défini par la norme NA 455 équivalente à la norme EN 933-8. L'équivalent de sable est le rapport entre la hauteur du dépôt de sable visible et la hauteur totale y compris le floculat.

Théoriquement, les limites extrêmes des valeurs de E.S. seraient de 100 pour les sables purs ne contenant pas de floculats et de 0 pour l'argile pure où il n'y aurait pas de dépôt de sable. Les seuils recommandés par la norme NA 5043, pour la fabrication du béton, doivent être supérieurs à 65 ou 50 selon le cas (voir tableau 2.3). Dans le cas où les valeurs spécifiées ne sont pas atteintes, il est préconisé de procéder à un essai au bleu de méthylène.

Sur un plan pratique, il est possible d'estimer que le sable dont l'E.S. est compris entre 75 et 85 convient parfaitement pour les bétons de haute qualité. Enfin, pour les sables présentant

des valeurs supérieures, signe de manque presque total de fines, il est à craindre un défaut de plasticité du béton qui devra être compensé de préférence sans majoration du rapport Eau/Ciment [Dreux, 1998].

Essai au bleu

Dans le cas où les valeurs de l'équivalent de sable ne sont pas atteintes comme cité précédemment, le sable peut cependant être considéré comme satisfaisant si la valeur de bleu de méthylène est inférieure à 1 ($MB \leq 1$). L'essai équivalent de sable ne donne pas d'indication sur la nature des fines contenues dans le sable, par exemple, une même valeur peut être obtenue aussi bien avec une forte quantité de fines non argileuses qu'avec une petite quantité de fines argileuses. Il faudra, surtout en cas d'utilisation de sable de concassage ou tout autre sable contenant un pourcentage élevé de fines, compléter l'équivalent de sable par l'essai au bleu [Baron, 1982]. Cet essai permet d'évaluer la nocivité des fines, qui est importante lorsqu'elles contiennent des matières argileuses [Dreux, 1998].

Dans cet essai au bleu, il est déterminé la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-moléculaire les particules fines étudiées. Le résultat de l'essai est exprimé en grammes de bleu par kilogramme de fraction 0/2 mm [NA 1948].

Matières organiques

La teneur en matières organiques doit être aussi faible que possible. En effet, certaines matières organiques peuvent perturber considérablement et même stopper la prise et le durcissement de la pâte de ciment. Faute de pouvoir identifier les matières organiques nocives autrement que par des méthodes lourdes et coûteuses, on limite la teneur globale en matières organiques. Dans la majeure partie des cas, le sable est soumis à un test colorimétrique [Baron, 1982], où il faut que la couleur d'une solution aqueuse à 3 % de soude dans laquelle un échantillon de granulat est plongé pendant 24 heures, soit moins foncée qu'une solution type. En cas de doute, il est recommandé de comparer les résistances mécaniques de mortiers fabriqués avec le sable douteux à celles obtenues sur un mortier fabriqué avec le sable normalisé [Baron, 1982].

2.3.4. Foisonnement des sables

Le volume occupé par un poids donné de sable sec augmente en même temps que son humidité. Ce phénomène peut donc avoir une influence importante lorsque le dosage du béton

est réalisé, non pas en poids, mais en volume. De là découle la définition du coefficient de foisonnement F, qui exprime en pourcentage l'augmentation de volume correspondant à une humidité donnée, par rapport au volume occupé par la même quantité de sable mais à l'état sec :

Ce coefficient de foisonnement est d'autant plus important que le sable est plus fin [Dreux, 1998]. La présence d'humidité dans les granulats nécessite une correction des proportions de la composition finale : on doit soustraire de la masse d'eau ajoutée au mélange la masse d'eau libre contenue dans les granulats alors que la masse des granulats humides doit être augmentée de cette même quantité. L'importance du foisonnement dépend du pourcentage d'humidité présente dans le sable et sa finesse. L'augmentation de volume d'un sable croît en fonction de son humidité avec un foisonnement qui peut atteindre 20 à 30%.

2.3.5. Friabilité des sables

L'essai de friabilité est le seul essai mécanique s'appliquant aux sables. C'est un essai micro-Deval sur 500 g de sable, la charge de billes étant différente de celle utilisée pour l'essai sur gravillons. Après 15 minutes de rotation de la jarre, le poids P des passants au tamis de 50 µm, est récupéré. Le coefficient de friabilité est [Baron, 1982 ; NA 2608] :

$$\mathbf{FS} = \frac{100 \times P}{500}$$

FS est d'autant plus élevé que le sable est friable. Pour les sables naturels d'origine alluvionnaire ou pour les sables artificiels de recyclage et les autres, la résistance mécanique est déterminée par la mesure de ce coefficient de friabilité. Selon l'ancienne norme, la valeur spécifiée supérieure est fixée à 60 ($FS \leq 60$). Cependant, cette caractéristique n'est plus considérée que dans l'Instruction Interministérielle portant sur les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour béton hydraulique [Instruction, 2007].

2.3.6. Les Analyses Chimiques

Certains éléments chimiques contenus dans les sables affectent grandement le comportement des bétons dès qu'ils dépassent certaines teneurs admissibles fixées par les normes. Donc, il est essentiel de compléter les essais de caractérisation par des dosages chimiques. L'objectif est de déceler la présence d'éléments nocifs dans les sables et de les quantifier. Les éléments les plus nocifs sont les sulfates, les sulfures et les chlorures, à un degré moindre le fer et le

magnésium. Les sulfates et les sulfures exprimés sous forme de SO₃ provoquent la formation d'étringite très expansive dans le béton durci, le gonflement et la fissuration de celui-ci ainsi que l'attaque des armatures. Les chlorures perturbent la prise du ciment et attaquent les armatures en particulier celles de précontraintes. L'instruction interministérielle de 2007 ne fixe pas de teneur limite mais les spécifications de la norme NA 5043 imposent un seuil de la teneur maximale en ions chlorures à 0,01 %.

2.3.7. Récapitulatif des caractéristiques des sables à béton

Les seuils de toutes les spécifications suscitées relatives aux sables à béton sont regroupés dans le tableau 2.3. Les exigences mentionnées sont celles des normes en vigueur et celles stipulées par l'Instruction Interministérielle applicable aux sables de concassage [Instruction, 2007].

Tableau 2.3 : Tableau récapitulatif des exigences relatives à un sable pour béton [NA 5043 ; Instruction, 2007]

Caractéristique Catégorie	Norme NA 5043				Instruction interministérielle
	A	B	C	D	
Teneur en fines < 0,063 mm	< 10	< 16		< 22	12 à 18
Module de finesse MF	2,4 à 4 1,5 à 2,8		2,4 à 4 1,5 à 2,8 0,6 à 2,1		1,8 à 3,2
Equivalent de sable ES	> 65 ou 60	> 60 ou 50			> 60 ou 65
Valeur au bleu MB impureté	< 1 < 0,1				< 1
Soufre total S	< 0,4	< 1			< 0,3
Absorption d'eau Ab	< 2,5	< 5	< 6	déclaré	< 5
Chlorure Cl	< 0,01				
Friabilité	-				< 40 ou 60

La synthèse des exigences normatives rapportées dans le tableau précédent, permet d'émettre les constatations suivantes :

- L'instruction interministérielle relative aux sables de concassage ne fait pas référence aux catégories, comme c'est le cas dans la norme NA 5043, ce qui sous-entend que les seuils prescrits dans cette instruction s'appliquent aux bétons sans aucune distinction précise ;

- Les seuils préconisés par l'instruction s'insèrent globalement dans les plages recommandées par la norme en vigueur, exception faite pour la friabilité non considérée par NA 5043, mais introduite dans l'instruction (avec un seuil de 60). Aussi le module de finesse peut atteindre une valeur de 3.2, selon les prescriptions de l'instruction, une limite plus élevée que celle mentionnée dans la norme. Cette mesure s'accorde bien avec les sables de concassage qui se caractérisent par leur taux élevé de fines.
- Les restrictions de la norme sur le taux de fines permettent d'atteindre une limite de 22%, pour les bétons de catégories D. En revanche cette caractéristique est limitée à 18% dans l'instruction. Au regard des fines très présentes dans les sables de carrière, il serait judicieux de reconsidérer ce seuil et de l'aligner avec celui préconisé par la norme. L'impact d'une telle modification aura des répercussions positives sur le plan technique, économique et environnemental.

2.4. Les sables pour béton disponibles en Algérie

2.4.1. Sable de concassage

Les sables de concassage constituent une ressource fort intéressante pour subvenir, du moins partiellement, au besoin grandissant du marché de la construction. Non seulement leur utilisation contribuerait à atténuer la tension sur les matériaux « classiques » qui se raréfient ; mais en plus réduirait un problème environnemental causé par leur présence en quantité énorme dans les carrières. L'utilisation effective des sables de concassage dans l'industrie du béton, leur valorisation et étude de leur influence sur les performances du béton remonte déjà à plusieurs années. Les recherches sur ce matériau sont toujours à l'ordre du jour. Notamment, l'influence du taux des fines élevé qu'ils renferment sur la durabilité des bétons. Cette caractéristique constitue une limitation à leur utilisation et nécessite des adaptations.

2.4.1.1. Définition

Du point de vue géologique, le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches et dont la dimension est comprise entre 0.063 et 2 mm. Dans l'industrie des granulats, les sables sont des particules allant de 0 à 4 mm. Les sables de concassage, issus du broyage de roches massives, correspondent aux éléments

inférieurs à 2 mm, et peuvent aller jusqu'à 4 mm. Leur courbe granulométrique concave est caractéristique de ce type de sable avec des éléments fins non argileux entre 20 et 80 µm. En fonction de la technologie de concassage utilisée, un sable concassé contient plus ou moins de fines inférieures à 63 µm qu'il est possible de récupérer en modifiant le cyclonage.

2.4.1.2. Origine et disponibilité

En Algérie, il existe 782 unités de production de granulats. La production de chaque carrière est de 10 à 400 tonnes/heures, avec une production annuelle totale de 68 millions de tonnes [Rap Mines, 2009], 33% de cette production est destinée aux routes, 47% aux constructions et 20% (soit 13.5 millions de tonnes) sont des sables rejetés à cause de leur forte teneur en fines (15 à 25%). Ils sont non-conformes aux règlements en vigueur. Sachant que la demande annuelle en sable est de l'ordre de 25.1 millions de tonnes, les 13.5 millions de tonnes de sable rejetés constituent environ 54% de la demande en sable. Ces sables sont généralement mis en dépôt afin qu'ils soient éventuellement vendus à très bas prix. Les réserves de production de granulats des différentes carrières de L'E.N.G sont données dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Réserves et capacité de production des granulats de l'E.N.G [Rapport Mines, 2009].

Unité	Réserve totale (tonnes)	Capacité de production (tonnes/an)	Production réelle (tonnes/an)
El Khroub	72 000 000	1 000 000	800 000
Ben Azouz	87 000 000	1 000 000	800 000
Aïn Touta	68 000 000	1 000 000	800 000
El Ma Labiod	74 500 000	600 000	500 000
Si Mustapha	43 000 000	1 000 000	800 000
El Hachimia	38 100 000	600 000	500 000
Sid Ali Ben Youb	68 000 000	1 000 000	800 000

2.4.1.3. Caractéristiques des sables de concassages

Les sables de concassage (SC), à granularité étalée, est un sous-produit de concassage des roches massives. Ils ont une masse volumique légèrement plus élevée que celle des sables alluvionnaires. De manière générale, ils sont plus anguleux, plus écaillés et plus allongés que ceux d'oued. Concernant leur propreté, la valeur au bleu, les teneurs en matières organiques,

en impuretés et en éléments coquilliers sont comparables à celles des granulats alluvionnaires. La spécificité des sables de concassage est leur importante teneur en fines (> 9%) et leur équivalent de sable plus faible.

Effectivement, Le tableau 2.5 montre que le sable de concassage présente un pourcentage de fines élevé en comparaison avec celui du sable d'oued mais il reste dans les limites recommandées par la norme [NF XP P 18-545]. Cette teneur en fines dépend de sa structure pétrographique, de la taille des grains, de la qualité du ciment de la roche mère et en partie de la nature du concassage [Cardon, 1984].

Tableau 2.5 : Caractéristiques de quelques sables de concassages

Origine des sables	Masse volumique réelle (kg/m³)	Module de finesse	ESV (%)	Taux de fines (%)
El Hachimia, Bouira [Djelloul, 2010]	2540	3.02	83.26	12
Djebel Abiod, Tlemcen [Boukli, 2009]	2500	2.95	63.2	17
Laghouat [Bouziani,2013]	2700	2.14	82.8	10
Jbel Ressas, Tunisie [Joudi, 2012]	2690	2.61	67.27	16
Nord Tunisie [Rmili, 2011]	2703	2.82	78.6	12.77
J. El Moucef [Ltifi, 2005]	2660	2.93	60	14.19

2.4.1.4. Utilisation des sables de concassage dans le béton

L'utilisation du sable de concassage dans le béton a considérablement augmenté au cours des 25 dernières années, en particulier dans les régions où les sables naturels sont rares. Malgré l'utilisation élargie de ces sables manufacturés, les méthodes actuelles d'évaluation de la qualité globale sont principalement basées sur les performances du sable naturel. Ces spécifications concernent la granulométrie, l'équivalent de sable, les impuretés organiques et le module de finesse. Même si le sable d'une source particulière répond à toutes ces exigences, il n'y a aucune garantie que le sable permettra l'obtention des performances souhaitées de façon satisfaisante dans le béton. D'autres caractéristiques de sable comme la

minéralogie, la forme des particules, et la texture de la surface ne sont pas nécessairement mesurées par des tests classiques. Pourtant, ils peuvent fortement influencer la performance globale [Cortes, 2008].

T. Celik et al (1996) ont entrepris l'étude de l'effet du taux de fines sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons. L'ouvrabilité des bétons a été réduite avec l'augmentation des fines. En revanche, les résistances (à la compression et à la traction par flexion) ont augmenté jusqu'à une teneur de 10 % de fines et ont rechuté au-delà de ce taux (figure 2.1).

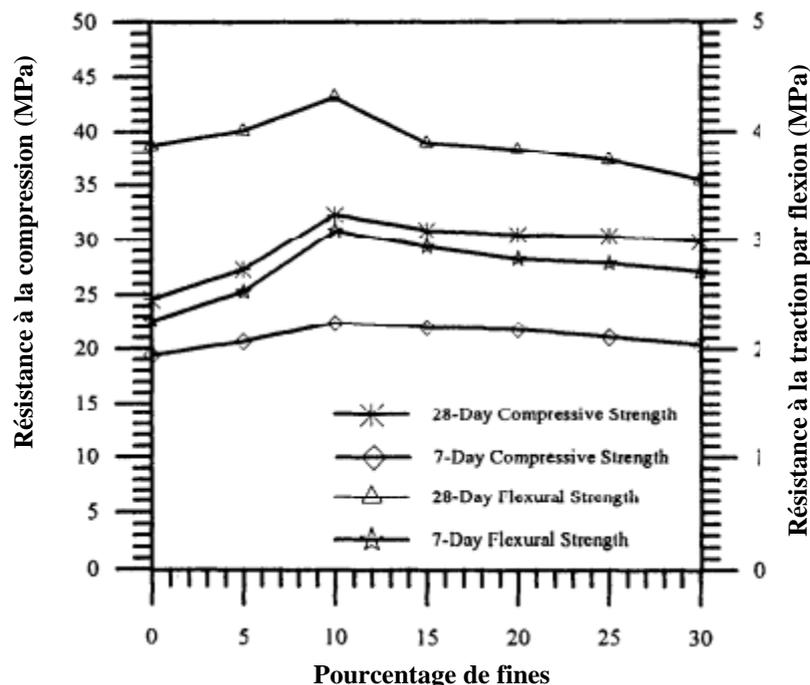


Figure 2.1 : Les résistances des bétons avec sable de concassage en fonction du taux de fines [Celik, 1996]

Beixing Li et al (2009) ont étudié l'effet du taux des fines du sable de concassage sur les performances mécaniques et de durabilité des bétons. Pour le béton ordinaire, il a été constaté qu'entre 0 et 20 % de fines, une amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorures. Pour les bétons à hautes performances, aucune incidence n'a été constaté jusqu'à 15 % de fines. Globalement, il a été mis en exergue que des bétons durables peuvent être fabriqués à partir de sable de concassage renfermant 10% de fines au moins.

R'mili et al (2011) ont entrepris une recherche consistant à incorporer le sable de concassage (SC) dans la composition des bétons et étudier l'effet de son remplacement progressif par le

sable de dune (SD) sur le comportement à l'état frais et durci des bétons autoplaçants. L'étude expérimentale montre que les paramètres d'ouvrabilité des BAP sont améliorés lorsque le SC est partiellement remplacé par le SD (< 30%). Cependant, à une teneur élevée en SD (> 30%), des quantités supplémentaires en eau et en superplastifiant sont nécessaires, pour aboutir aux propriétés autoplaçantes. Les résistances mécaniques diminuent en ajoutant le SD au SC, mais elles atteignent des valeurs acceptables pour des dosages modérés en SD. Les performances des bétons autoplaçants sont nettement meilleures que celles des bétons ordinaires confectionnés avec les mêmes granulats. Les essais de durabilité montrent que les coefficients d'absorption d'eau par capillarité et par immersion augmentent en ajoutant le SD au SC alors que le coefficient de perméabilité diminue.

Donza et Al (2002) ont valorisé les sables de concassage de différente nature pétrographique dans la formulation des bétons hautes performances pour tirer avantage du taux élevé de fines qu'ils renferment. Il a été conclu que l'effet du sable concassé sur le béton frais présente quelques inconvénients par rapport au sable naturel. Les sables concassés nécessitent une dose plus élevée de pâte pour compenser l'effet négatif de la forme des particules sur la rhéologie. L'optimisation du squelette granulaire doit être étudiée minutieusement. Par ailleurs, la forme et la texture des particules de sable concassé ont un effet important sur l'adhérence entre la pâte et le granulat, conduisant à une amélioration de la résistance du béton.

Joudi-Bahri et al (2012) ont procédé à l'ajustement des taux de fines des sables issus de carrières à 0, 6, 12, 18 et 24 % afin de mesurer leur influence réelle sur le comportement des bétons. Pour un dosage en ciment CEMI de 350 kg/m^3 , une quantité de fillers de 100 à 130 kg/m^3 pour les bétons ordinaires et de 60 à 80 kg/m^3 pour les bétons superplastifiés, permet d'augmenter la compacité et d'améliorer sensiblement les performances mécaniques. Aussi, toutes les catégories normatives des sables de concassage (f_3 à f_{22}) peuvent être utilisées à priori, sous réserve toutefois, de satisfaire aux exigences liées aux classes d'exposition. Les catégories f_{10} et f_{16} sont les plus intéressantes et permettent d'optimiser les propriétés des bétons. La catégorie f_{Dec} n'est pas exclue, elle est préconisée pour les bétons autoplaçant (BAP) en apportant toute ou une partie de la quantité de fillers fortement présente dans ce béton.

L'étude de Djeziri et al (2010) vient s'ajouter à celles sur les bétons hydrauliques à base de sable de concassage, par une analyse de durabilité à court et à long terme en ciblant plus particulièrement, l'effet combiné des fines calcaires et du superplastifiant sous différents modes de cure. Le comportement en milieux agressifs, notamment les milieux sulfuriques et les milieux marins ont aussi suscité l'intérêt. Il a été mis en exergue la possibilité d'utilisation du sable de concassage avec un taux de fines allant jusqu'à 20 % sans affecter les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

Boukli et al (2009) ont étudié l'influence du pourcentage de l'air occlus dans les bétons sur sa consistance ainsi que l'influence de ces deux paramètres (affaissement et pourcentage d'air occlus) sur la résistance à la compression des bétons. Il a été constaté que l'utilisation d'un sable de concassage provenant de Tlemcen, ayant 17 % de fines, permet de formuler des bétons ayant de bonnes propriétés rhéologiques à l'état frais avec un niveau acceptable de performances mécaniques.

T. Bouziani (2013) s'est penché sur le mélange de sable de dune et sable de concassage dans la formulation de BAP et l'établissement de modèle statistique pour la prévision de leurs performances à l'état frais et durci. Les résultats indiquent que la résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours a augmenté avec l'augmentation de la proportion du sable de concassage et diminue avec l'augmentation de la proportion de sable de dune. Pour l'obtention des performances à l'état frais désirées, des proportions de chaque sable ont été proposées.

La recherche de Menadi et al (2008) avait comme objectif d'étudier initialement l'effet des fines calcaires contenues dans le ciment et le sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers. En deuxième lieu, une étude plus poussée a été menée sur l'impact de l'ajout des fines calcaires, issues du sable de concassage, sur la durabilité à long terme des bétons fabriqués avec différents ciments composés. Autrement dit, l'investigation a porté sur l'influence des fines calcaires du sable concassé sur les propriétés du béton, notamment la résistance, la perméabilité à l'eau, au gaz et aux ions chlorure et l'absorption d'eau par capillarité. Quatre types de ciment ont été utilisés tout en conservant un rapport eau/ciment constant.

L'étude de l'effet des fines calcaires sur les propriétés de durabilité des bétons à base de sable de concassage a montré que l'absorption capillaire des bétons contenant du sable de concassage à 15% de fines calcaires est comparable à ceux des bétons sans fines pour tous les

types de ciments utilisés. Par ailleurs, l'incorporation des fines calcaires à un taux de 15%, diminue la résistance à la pénétration des ions chlorures et augmente la perméabilité au gaz de tous les bétons étudiés. La présence des fines de calcaire de 15% en tant que substitut partiel, permet la réduction de la perméabilité à l'eau des bétons. En revanche, il est constaté une augmentation de la pénétration des ions chlorures et de la perméabilité au gaz. L'augmentation de ces deux indicateurs signifie que l'utilisation en structures exposées à l'environnement marin de ce béton à base de sable de concassage avec 15% de fines calcaires, devrait être limitée.

De plus, l'incorporation de 25% de fines calcaires comme substitution au sable de concassage diminue la résistance à l'attaque des sulfates de magnésium et de sodium du béton. Globalement, il a été retenu que le béton contenant 15% de fines calcaire en remplacement de sable concassé réduit la perméabilité à l'eau et augmente la perméabilité aux gaz et des ions chlorure.

2.4.2. Sable de dune

Aujourd'hui, lorsqu'on évoque le sable de dune, c'est principalement pour rappeler qu'il engloutit les terres, les palmeraies, et menace d'envahir certaines oasis. Pourtant, en modifiant notre point de vue, le sable de dune peut être considéré comme une source quasi inépuisable de matériau. L'utilisation et l'exploitation futures de ce type de sable constituent ainsi une des nouvelles préoccupations des chercheurs et intéressent différents domaines comme la microélectronique, l'énergie solaire (cellule photovoltaïque), la métallurgie, le génie civil, et le génie mécanique. Ses applications et son exploitation sont liées à sa teneur en silice et à la taille, la forme et la nature de ses grains.

2.4.2.1. Définition d'un sable de dune

Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes qui occupent de vastes territoires dans le sud algérien. La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire de ces sables, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation [Oldache, 1988]. Pour certains auteurs [Zoght, 1979], la dune est d'autant plus dorée qu'elle est plus ancienne, chaque grain ayant au contact de l'air le temps de s'oxyder et de roussir. En réalité, la couleur du sable reflète d'abord celle de ses éléments

constitutifs, selon leurs proportions en minéraux lourds colorés : amphibole, pyroxène, topaze, zircon etc.

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage où de puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

Le sable est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles (les silicates sont la famille la plus abondante dans la nature, représentant 90 % en masse de l'écorce terrestre). Les sables de dunes sont essentiellement des sables siliceux très propres, leur teneur en carbonate et en argile se trouvant sous forme de traces.

2.4.2.2. Formation et localisation des sables de dune

Les dépôts de sable éolien couvrent environ 6% de la surface émergée du globe, dont environ 97% se trouve dans les grandes zones arides. En moyenne, environ 20% des zones arides du monde sont couvertes par des sables éoliens. Les proportions vont de 2% en Amérique du Nord à plus de 30% en Australie, 25% en Afrique et supérieur à 45% en Asie centrale comme montré sur la figure 2.2 [Pye, 2009].

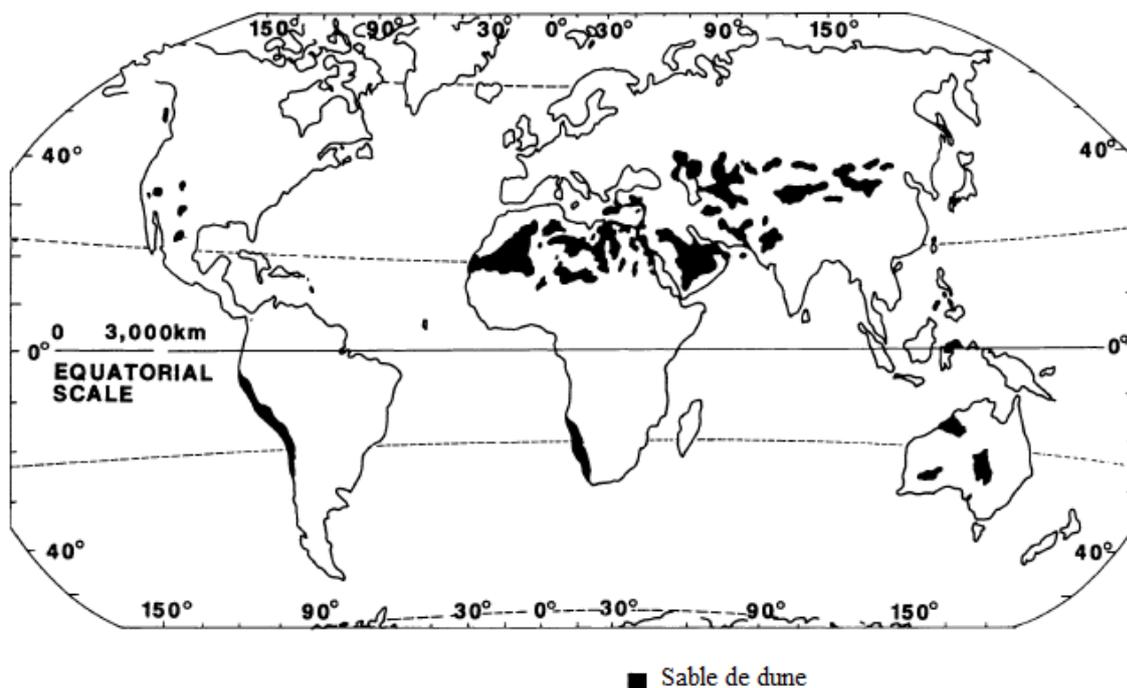


Figure 2.2 : Répartition des sables de dune dans le monde [Pye, 2009]

D'après plusieurs études réalisées dans les régions sahariennes, les sables dunaires ont pour origine la désagrégation des roches sous l'effet conjugué des chocs thermiques et de l'altération des sols constituant les lits d'oueds ou d'anciens fleuves [Vial, 1978]. On constate que l'intensité des vents de sable et leurs directions ont une action déterminante sur la localisation et l'ampleur des gisements en liaison avec la topographie du terrain.

Les sables de dune se trouvent dans les régions sud algériennes couvrant 60% de la superficie globale [Kettab, 2007]. Ils sont situés en zone présahariennes. Ces dunes sont constituées de nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara (voir figure 2.3). On relève deux grandes zones géographiques où l'on constate une concentration d'importantes quantités de sable de dune. Il s'agit du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental.



Figure 2.3. Situation géographique des ergs de l'Algérie [Tafraoui, 2009]

2.4.2.3. Caractéristiques des sables de dune

Les sables de dune sont des sables fins, homométriques, dont les grains, de nature siliceuse, ont un diamètre maximal ne dépassant pas un millimètre. Ils sont disponibles en surface et en

abondance principalement dans les régions du Sud du Pays. Si ces sables sont très abondants et offrent une exploitation facile et économique, ils présentent l'inconvénient d'avoir des masses volumiques apparentes faibles du fait de l'uniformité de leurs grains et de leurs finesses (tableau 2.6). Ils exigent donc une assez forte demande en eau de gâchage.

Tableau 2.6 : Exemples de caractéristiques de sables de dune algérien [Benna, 2005]

Origine des sables	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Coefficient d'absorption d'eau (%)	Module de finesse	ESV* (%)	ESP** (%)
Boussaâda	2419	0.44	0.83	88	72
Hassi Bahbah	2416	0.46	0.73	93	73
Oum Zabed	2480	0.32	1.18	90	77
Touggourt	2455	0.36	1.38	89	73
Ouargla	2486	0.30	1.38	91	71
Timarine	2470	0.36	1.10	87	75
Hamria	2412	0.41	1.17	90	75
Maâraf	2496	0.42	0.99	83	72
Laghouat	2445	0.36	1.18	93	71
El Oued	2423	0.39	1.20	95	77

*ESV : équivalent de sable visuel

**ESP : équivalent de sable au piston

Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface.

Le diamètre des plus gros éléments des sables de dunes du Sahara est de l'ordre de 1 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm. La figure 2.4 montre des courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans différents endroits du Sahara algérien.

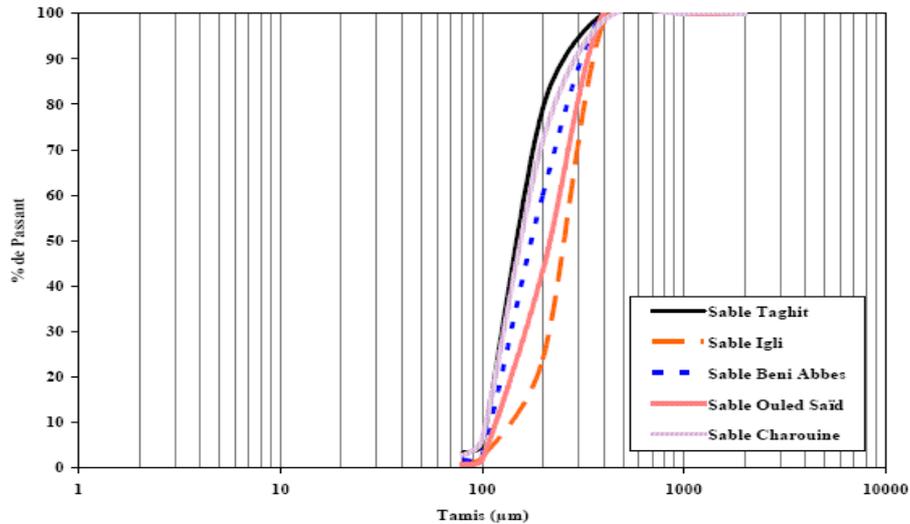


Figure 2.4 : Courbes granulométriques de deux sables de dunes [Tafraoui, 2009].

Quant à sa propreté, Le sable de dune est très propre et ne contient pratiquement pas de trace d'argile. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60 %. La valeur de bleu est de l'ordre de 0,1.

Tableau 2.7 : Récapitulatif des caractéristiques des sables de dunes

Caractéristiques	Valeurs	Exigences	Observations
granulométrie	Même distribution granulaire	-	Granulométrie serrée homométrique
Classe granulaire	$D_{max} < 1 \text{ mm}$	$D_{max} < 1$ pour les sables à béton	Appartenance à la famille des sablons
Module de finesse	$0.73 < MF < 1.38$	$1.8 < MF < 3.2$	Matériau très fin
Propreté des sables	$E_{ps} > 70$	$E_{ps} > 65$	Matériau propre
Masse volumique réelle	$> 2400 \text{ kg/m}^3$	$> 2000 \text{ kg/m}^3$	Sable courant
Absorption d'eau	$A_{bs} > 0.30$	$A_{bs} < 6$	Faible absorption
Matière organiques	Aucune présence de matière organique	Résultat négatif	
Les sulfates	De 0 à 0.05	$SO_3 < 0.2$	Teneurs très faibles, pas de nuisance
Les chlorures	De 0.01 à 0.05	< 0.1	
Analyse chimique	Teneur prédominante en SiO_2	-	Nature siliceuse
Porosité	$42 < P \% < 45$	-	Porosité importante
Coefficient de foisonnement	$47 < f < 53$	-	Coefficient de foisonnement élevé

D'après le tableau 2.7, il apparaît que les sables de dune ont des caractéristiques physico-chimiques très voisines. En effet, ce sont des sables très fins, propres et de nature siliceuse. Les propriétés essentielles qui les caractérisent sont une importante porosité et une surface spécifique élevée des grains. Les sables de dune sont mono-granulaires, de dimension voisine de 1 mm et ont un module de finesse ne dépassant guère 1,0. Cette dernière caractéristique constitue un inconvénient quant à leur utilisation dans les mortiers et bétons hydrauliques en leur conférant une maniabilité médiocre.

Les principales conséquences qui résultent de l'utilisation des sables de dune dans le béton sont un fort dosage en fines pour améliorer la compacité du squelette granulaire et un excès d'eau de gâchage pour assurer une bonne mise en œuvre. Cet apport supplémentaire en eau serait préjudiciable à la durabilité des mélanges.

2.4.2.4. Utilisation des sables de dune dans le béton

L'utilisation des sables de dune peut se justifier par l'épuisement de certaines sources de sables traditionnelles, en particulier alluvionnaires ou marines et par les exigences accrues en matière d'environnement. Le recours à de tels matériaux ne doit en aucun cas se traduire par un abaissement quelconque de la qualité des ouvrages à réaliser. De ce fait, plusieurs études portent sur l'incorporation de ce sable dans le béton de plusieurs manières.

Benamara et al (2010) ont étudié la possibilité d'élaborer un béton à hautes performances avec des matériaux locaux, notamment les fines calcaires et le sable de dune broyé. Des résistances à la compression de 71 MPa ont été atteintes à 28 jours, allant jusqu'à 85 MPa à 270 jours. Il a été constaté que l'incorporation de 15 % de sable de dune broyé a permis l'augmentation des performances mécaniques et la durabilité des bétons.

Dans son utilisation comme sable pour béton, il a été incorporé surtout comme correcteur avec les sables grossiers pour les bétons ordinaires. Laquerbe et al (1995) ont constaté que les sables de dunes peuvent se substituer très valablement à ceux des plages avec des résistances équivalentes. L'incorporation de ce sable dans son état naturel conduirait même à une petite augmentation des résistances des bétons. En général, le sable de dune est associé à d'autres matériaux (granulats et liants) pour constituer des mélanges ou composés conformes. On

relève que l'apport de ce type de sable contribue à jouer un rôle secondaire tel que servir à la correction du module de finesse d'un sable grossier selon le cas de figure. Les sables de dune utilisés seuls donnent des mélanges à maniabilité faible avec des résistances mécaniques tout juste admissibles. Leur utilisation devient plus intéressante s'ils sont mélangés avec soit des sables courants, soit avec un adjuvant et des fines. R'mili (2012) dans sa recherche a étudié l'effet de remplacement progressif du sable de concassage par le sable de dune, sur le comportement à l'état frais et l'état durci des BAP. Les paramètres d'ouvrabilité des BAP se trouvent améliorés lorsque le sable de concassage est partiellement remplacé par moins de 30% de sable de dune. Néanmoins, le niveau des performances mécaniques diminue et les valeurs atteintes restent acceptables.

D'autre part, les résultats des travaux de [Taфраoui, 2009] montrent que le sable de dune est un matériau prometteur puisqu'il permet d'obtenir à la fois une très bonne fluidité des bétons fibrés ultra performants (BFUP) et aussi de meilleures résistances mécaniques lorsqu'il est associé au métakaolin. Son comportement vis-à-vis de l'étuvage est aussi très favorable. Tous les résultats de résistance obtenus en compression dépassent les 200 MPa. Ainsi, il a été démontré qu'il est parfaitement possible de réaliser des bétons ultra hautes performances (BUHP) ou bétons fibrés ultra performants (BFUP) en utilisant du sable de dune et du métakaolin. Une voie de valorisation très intéressante a été trouvée pour le sable de l'erg occidental pour la confection de bétons spéciaux aussi bien sur le plan technique qu'économique. Ce type de matériau pourrait être envisagé dans la fabrication d'éléments de construction préfabriqués.

Le sable de dune est aussi exploité pour confectionner les bétons de sable. Les quantités introduites dans ces cas sont plus importantes et sont de l'ordre de 50% [Kettab, 2007 ; Bouziani, 2012 ; Ghrieb, 2013].

2.5. Production de sable en Algérie

2.5.1. Production de sable de concassage

La politique d'encouragement de la production et de consommation de sable concassé en appoint au sable naturel de construction pour la préservation du sable des plages et des oueds

commence à porter ses fruits. La production est ainsi passée de 2,21 millions de m³ en 2005 à 13,4 millions de m³ en 2009, en augmentation de + 27,6 % par rapport à la seule année 2008 (figure 2.5). Le sable concassé commence à prendre la place qui lui revient par rapport au sable alluvionnaire. Son utilisation en Algérie dans la construction a permis de compenser le déficit constaté en sable naturel dans construction, et d'augmenter substantiellement ainsi l'offre globale en sables tous types confondus.

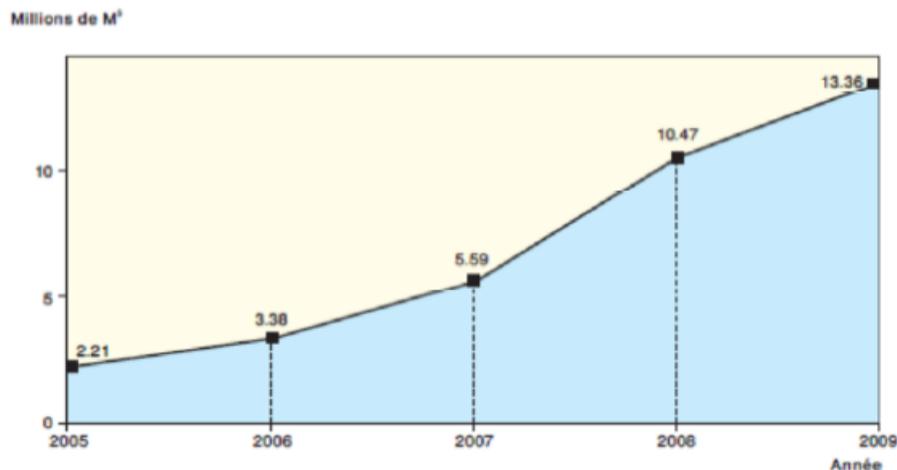


Figure 2.5 : Evolution de la production de sable concassé. [Rap Mines, 2009]

Au cours de l'année 2008, 637 exploitations minières de production de sable concassé étaient en activité dans 41 wilayas [Rap Mine, 2009]. Le secteur privé dispose de 504 exploitations minières en activité représentant 79,3% du total des exploitations produisant du sable concassé, contre 128 unités appartenant au secteur public correspondant à un taux de 20,7%. Le secteur privé totalise une production de 8,8 millions de m³ de sable concassé représentant 66,2% de la production totale (figure 2.6), contre 4,5 millions de m³ produits par le secteur public soit 33,8% [Rap Mine, 2009]. Depuis l'année 2005, la production de sable concassé est en augmentation continue, permettant ainsi de répondre à la demande croissante du marché du bâtiment et des travaux publics.

Le premier constat qui ressort au vu des chiffres annoncés est l'importance de la quantité de sable de concassage produite qui est quatre fois supérieure à celle du sable naturel.

Par ailleurs, les besoins en sable du marché algérien, nécessaire pour réaliser les projets ambitieux lancés par l'Etat, avoisinent les 159 millions de tonnes. Selon l'ENG (Entreprise Nationale des Granulats) le déficit en matière de granulats s'élève à 60 millions de tonnes, tous les domaines confondus (travaux publics, bâtiment, grande mosquée...). Il est constaté que les

quantités produites sont loin de satisfaire la demande accrue et le recours à d'autres alternatives est plus que nécessaire.

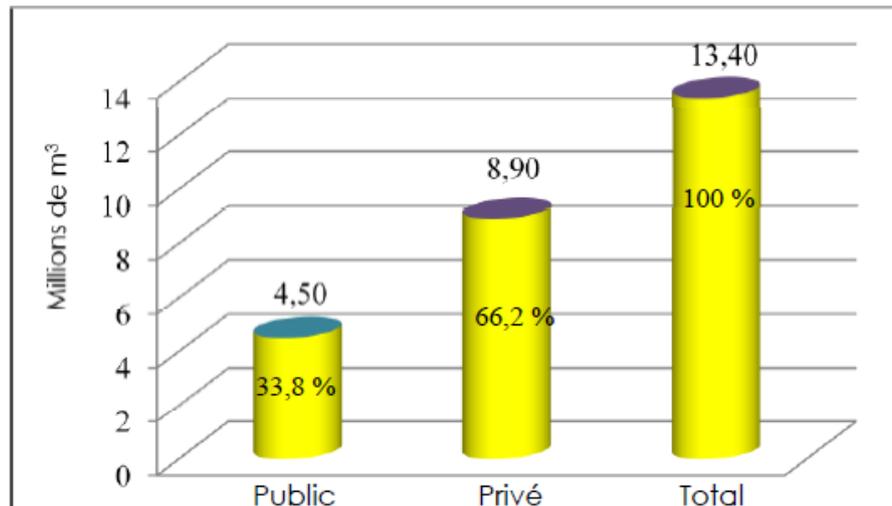


Figure 2.6 : Production nationale du sable concassé par secteur, [Rap Mines, 2009].

Dans ce contexte, on s'est intéressé dans cette recherche au tuf comme élément de substitution au sable pour venir conforter les efforts déployés dans la recherche de nouveaux matériaux locaux pour la construction. L'intérêt est essentiellement porté principalement sur son abondance en Algérie et les quantités susceptibles d'être produites. Concernant sa production, elle atteint une quantité de 7 524 130 m³, exclusivement utilisée en géotechnique. Cette quantité équivaut à 56% de la production de sable. Les capacités de production peuvent être revues à la hausse du fait de l'abondance de ce matériau.

2.5.2. Production de sable naturel :

La production du sable naturel pour l'année 2009, s'est élevée à 3 372 419 m³, en hausse de 10,8 % par rapport à l'année 2008 [Rap Mines, 2009]. 70 sablières sont en activité et implantées dans 20 wilayas, dont 65 appartenant au secteur privé et 05 au secteur public. Le secteur privé atteint une production de 2 766 048 m³ représentant 82% de la production totale nationale contre 606 371 m³ réalisée par le secteur public soit 18 %. (figure 2.7).

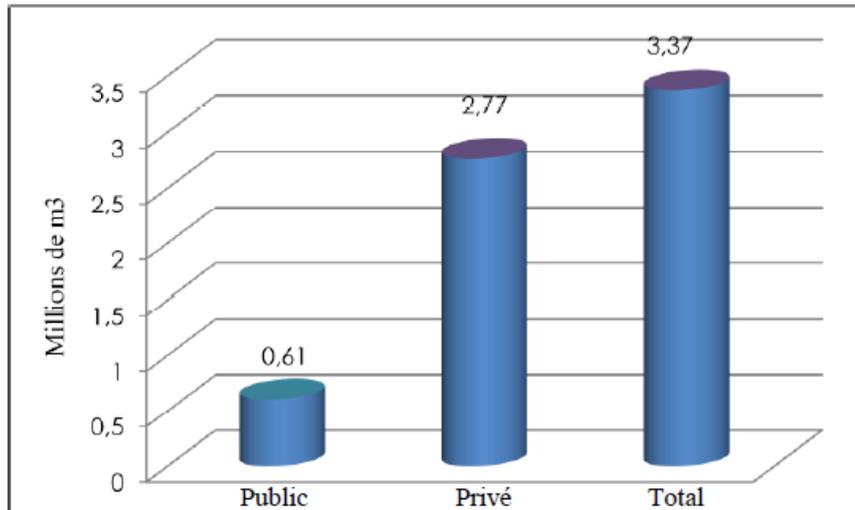


Figure 2.7 : Production nationale du sable naturel par secteur, année 2009

La concentration de production de sable naturel est située dans les wilayas de l'ouest. Aïn Témouchent avec sa production de 1 099 259 m³, représente près du tiers de la production nationale, soit un taux de 32,6 % (figure 2.8) suivie de la wilaya de M'sila avec 694 210 m³ soit un taux de 20,6%. Ces deux wilayas produisent à elles seules plus de la moitié soit 53,2% de la production nationale de sable naturel de construction.

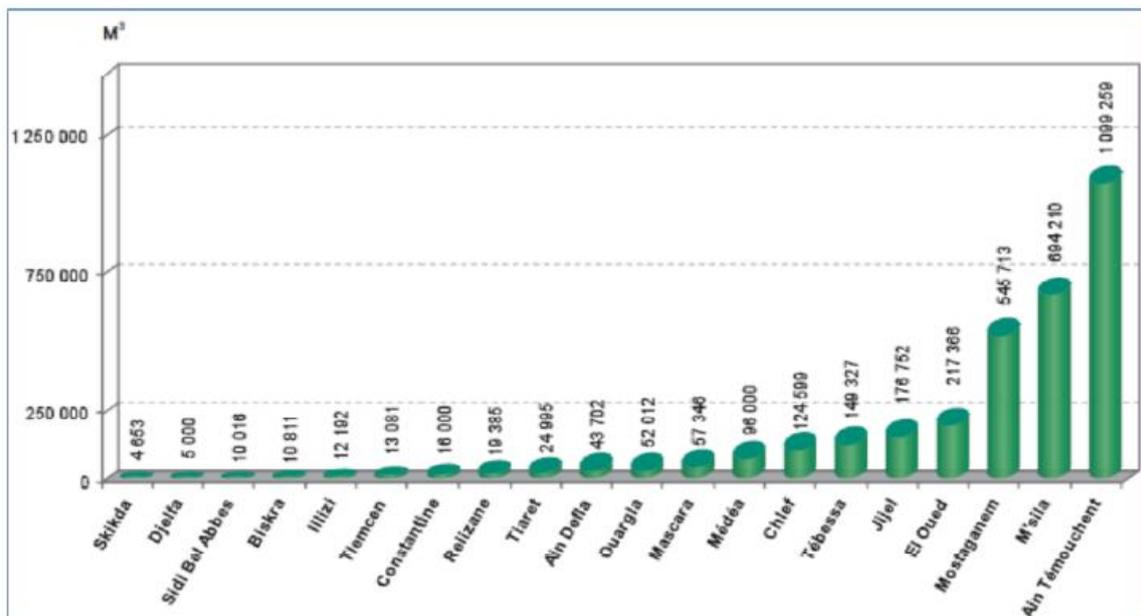


Figure 2.8 : Production du sable naturel par wilaya-année 2009 [Rap Mines, 2009]

Depuis l'année 2000, la production du sable naturel a connu deux périodes de croissance :

- la première entre 2000 et 2002 passant de 1 487 000 m³ à 1 880 000 m³ en 2002, puis une baisse en 2004.
- la seconde entre 2004 et 2009 passant de 1 366 000 m³ à 3 372 419 m³ en 2009 (figure 2.9).

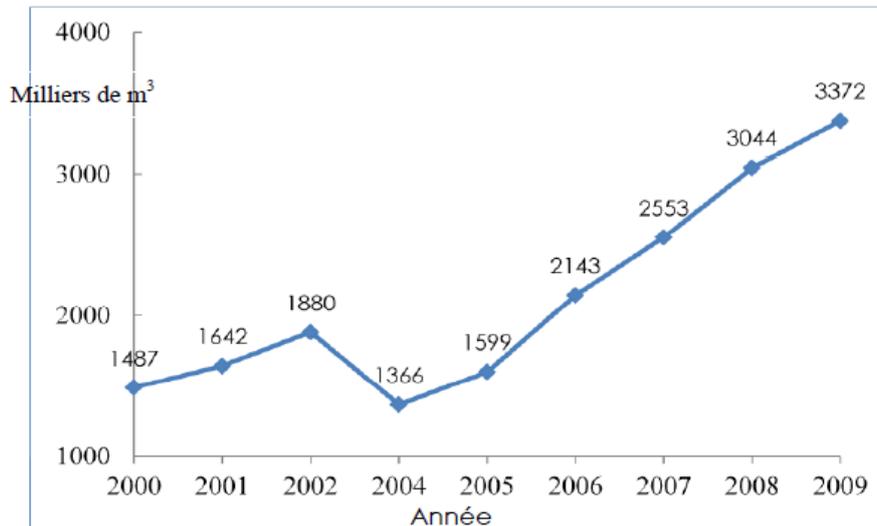


Figure 2.9 : Evolution de la production nationale du sable naturel période 2000 – 2009
[Rap Mines, 2009]

A titre d'exemple, Les besoins en matière de sable ont été estimés à 45 millions de tonnes pour la réalisation des grands projets de travaux publics sur la période 2005-2009 :

- 26 millions seront utilisés pour la construction routière,
- 10 millions pour les projets d'autoroute est-ouest, rocade et voies express,
- 04 millions pour l'entretien des routes,
- 05 millions de tonnes pour les ouvrages d'art.

2.6. Conclusion

Le sable est un constituant incontournable dans le domaine de la construction. La demande importante, en continuelle augmentation, a induit une tension incitant le recours à d'autres alternatives telle l'utilisation de matériaux de substitution. Le sable de concassage a été exploité

dans ce sens, ce qui a permis d'atténuer partiellement la tension sur le sable naturel et résoudre le problème environnemental posé par les grandes quantités de ce sable entreposées dans les carrières. Cependant, le taux de fines élevé qui le caractérise constitue un handicap, nécessitant des adaptations pour son utilisation dans le béton. Les recherches sur le thème continuent, surtout sur l'aspect durabilité des bétons.

Concernant le sable de dune, c'est un matériau dont l'utilisation procure un intérêt économique avéré, sa disponibilité permet son exploitation sans aucun traitement. Mais son utilisation ne peut qu'être partielle en tant que correcteur et associé à d'autres sables à cause de sa finesse et de sa porosité élevée.

Au regard des quantités produites et leur comparaison avec les besoins du marché, il est nécessaire de définir d'autres alternatives pour combler le déficit et réaliser les grands projets déjà lancés par l'Etat.

CHAPITRE III : LES BETONS

3.1. Introduction

Le béton est le matériau le plus utilisé au monde. Avec les quatre milliards de mètres cubes de béton produit annuellement, il est classé en deuxième place après l'eau [Aïtcin, 2000]. Ses utilisations sont multiples et permettent de construire des ouvrages de toute nature, notamment, des bâtiments, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, et d'autres. Cet engouement pour ce matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau constituent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des constituants, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques. En plus, il permet la réalisation des formes spécifiques et audacieuse du point de vue architectural et même technique. Grâce à sa mise en place à l'état fluide, il prend la forme des coffrages les plus complexes. D'autre part, s'il est correctement formulé et mis en œuvre, il procure une durabilité centenaire permettant ainsi une bonne tenue dans des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier, aux actions agressives de l'eau de mer. Son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau de construction par excellence.

Le béton est éventuellement le matériau composite le plus ancien. Il est élaboré à partir d'un mélange de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants parfois. Ces constituants sont dosés, en considérant leurs propres caractéristiques, afin d'avoir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide ayant les propriétés physiques et mécaniques escomptées. Son usage remonte à la plus haute antiquité, puisque Pline l'Ancien rapporte que les colonnes de certains monuments égyptiens, datant de plus de 4 000 ans, ont été faites avec un mélange de granulats et de gypse calciné. Il est en tout cas clair que Grecs et Romains ont réalisé des monuments en utilisant des matériaux avec les composants primaires s'apparentent à ceux des bétons d'aujourd'hui [Coutelas, 2003]. Ces derniers connaissent un grand essor. La maîtrise de leurs formulations, le développement que connaît l'industrie des adjuvants et des ciments font que les bétons actuels sont très variés en allant du béton ordinaire aux bétons ultra hauts performances, en passant par les bétons auto-plaçants. Dans ce chapitre, on présentera les bétons ordinaires et les bétons auto-plaçants, en focalisant sur les performances traitées ultérieurement dans la partie expérimentale.

3.2. Bétons usuels

3.2.1. Constituants du béton

Le béton est un matériau dont les propriétés sont étroitement liées à la nature et à la qualité de ses constituants et à leurs proportions relatives. Généralement, il est confectionné avec du ciment, des granulats, de l'eau et éventuellement, des adjuvants. Les granulats peuvent inclure des fillers et des ultrafines dans le cas de bétons spéciaux, mais ne sont pas introduit dans la composition des bétons usuels, qui font l'objet de cette section.

3.2.1.1. Le ciment

Le ciment est en effet le composant essentiel du mélange à partir duquel est fabriqué le béton. Les réactions physico-chimiques complexes qui se produisent entre le ciment, l'eau et les autres composants, qui constituent ce qu'il est coutume d'appeler le phénomène de durcissement du béton, conduisent à la formation d'un solide dont les différents éléments sont rigidement liés [Gmira, 2003 ; Neville, 2000].

Le ciment se présente sous la forme d'une poudre fine de couleur grise ou blanche. La dimension des grains de ciment est caractérisée par la valeur de la finesse Blaine qui mesure la surface totale des grains contenus dans 1 gramme ; la finesse Blaine des ciments est de l'ordre de 3 500 à 4 500 cm²/g. La dimension caractéristique des grains de ciment est d'environ 30 à 50 µm.

3.2.1.2. Les granulats

Les granulats sont constitués par les sables et les gravillons. Ils forment le squelette du béton. Ils se distinguent par leur nature, par leur dureté et aussi par leur forme.

Ils doivent être propres et chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils doivent répondre à certaines exigences de forme, de texture de surface, de dureté, de résistance à l'abrasion, de porosité et de tenue au gel.

3.2.1.3. Eau de gâchage

L'eau, dite eau de gâchage, doit présenter les propriétés d'une eau potable. L'eau joue un rôle double dans la technologie du béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et, d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais. Elle doit obéir aux spécifications préconisées par la norme NA 1966 [NA 1966, 2009].

3.2.1.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés en faibles quantités au béton frais afin d'en améliorer certaines propriétés. Les principaux adjuvants sont les plastifiants et fluidifiants réducteurs d'eau, qui remplissent deux fonctions : ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance fluide et même liquide ; ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton frais. L'influence des adjuvants peut varier sensiblement en fonction de la nature et de la composition du ciment ; des problèmes de compatibilité peuvent apparaître entre adjuvants et ciments.

3.2.2. La composition du béton

Un béton peut être caractérisé par trois critères : la durabilité et la résistance à la compression du béton durci, qui garantissent la pérennité et la sécurité des ouvrages, d'une part, et, d'autre part, la consistance ou la maniabilité du béton frais, qui mesure sa facilité de mise en œuvre. Ces propriétés dépendent de la qualité des constituants, mais aussi de la composition du béton, c'est-à-dire des quantités des divers intrants contenus dans 1 m³ de béton en place.

Dès 1898, René Féret a établi les principes d'optimisation de la composition conduisant à l'obtention de béton de résistance spécifiée. Il a énoncé la relation qui lie la résistance à la compression R_c d'un béton aux volumes de ciment c , d'eau e et de vides v contenus dans une unité de volume de béton durci :

$$R_c = K_{gran}K_{ciment} \left(\frac{\frac{c}{e+v+c}}{1 + \frac{c}{e+v+c}} \right)^2$$

Cette expression met en évidence le fait que la résistance R_c croît avec le dosage en ciment, des coefficients k dépendant de la nature des granulats et du ciment. Elle montre aussi que la résistance décroît lorsque croissent la quantité d'eau et le volume des vides contenus dans le béton.

Depuis Féret, de nombreuses méthodes de formulation de béton ont apparues; néanmoins la méthode proposée par Dreux – Gorisse est la plus utilisée pour la formulation des bétons ordinaires grâce à son aspect pratique.

Cette méthode (Dreux-Gorisse) est de nature fondamentalement empirique. La détermination des proportions volumiques des constituants granulaires, s'aboutit par le choix de la consistance et la fixation de la résistance à la compression désirée.

3.2.3. Propriétés du béton

Concernant les propriétés du béton, il faut distinguer celles qui concernent le béton frais et celles relatives au béton durci. Le matériau doit en effet être considéré sous deux formes :

- le béton frais, c'est l'état dans lequel il se trouve lors de sa fabrication où les constituants solides sont en suspension dans l'eau. Il se trouve en état foisonné dans et à la sortie des appareils assurant l'obtention d'un mélange homogène, et en état compacté dans son coffrage, après mise en place et serrage par vibration ;
- le béton durci dont les propriétés physiques et mécaniques se développent au cours des réactions physico-chimiques qui se déroulent entre ses composants.

Ses propriétés à l'état frais sont étroitement liées à l'eau, qui parmi tous les constituants du béton, elle reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est grâce à elle que le béton peut être manipulé. Réduire son dosage se répercute sur les performances du béton et permet:

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

La réduction d'eau rend par contre le béton moins plastique. Avec l'incorporation des adjuvants chimiques, le dilemme est résolu et il devient possible d'avoir une ouvrabilité améliorée avec une réduction d'eau.

3.2.3.1. Ouvrabilité

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés [Dreux, 1998]. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton:

- méthode et durée de transport ;
- quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats, adjuvants) ;
- forme, granulométrie et type de granulats ;
- le volume d'air ;
- le dosage en eau.

L'étude de l'ouvrabilité des bétons est largement documentée dans la littérature. Ses recherches se divisent en deux catégories, l'une se penchant sur l'influence des composants telle que la finesse et composition chimique du ciment, l'usage d'adjuvant ou d'addition, la teneur en eau, etc... La deuxième catégorie concerne les facteurs opératoires et méthodologiques tels que le mode de malaxage, le type d'appareil de mesure, etc... El-Harty et al (2007) a étudié l'effet de la teneur en sable de dune sur l'ouvrabilité du béton, figure 3.1. Il a été constaté que l'affaissement augmente jusqu'à 50 % d'ajout, toutes choses étant égales par ailleurs. Cette augmentation est attribuée à la forme des grains de sable (de dune) qui sont sphériques. Elles jouent ainsi le rôle de microbilles au sein du mélange et facilitent le glissement de tous les composants. Au-delà de 50 % d'ajout, la chute d'ouvrabilité constatée est causée par la quantité d'eau qui n'est plus suffisante avec l'augmentation de la surface spécifique de l'ensemble.

L'ouvrabilité peut être améliorée par l'ajout de l'eau et cela au détriment de la résistance. Cependant, il est possible de conserver les performances mécaniques avec maintien ou

réduction d'eau, d'un béton tout en améliorant sa fluidité en utilisant des plastifiants ou superplastifiants et aussi par augmentation de la quantité de sable. La forme des granulats joue un rôle sur la maniabilité du béton. La forme préférable est la forme sphérique. Une forme plate et cubique nécessite une quantité d'eau plus élevée. Concernant l'effet des fines des sables de concassage, les résultats obtenus sont disparates. En absence de superplastifiant l'augmentation de fines dans le béton conduit à une augmentation en eau pour l'atteinte de l'ouvrabilité désirée. Ceci est attribué à l'augmentation de la surface spécifique du mélange qui conduit à une demande en eau supplémentaire pour couvrir la surface de tous les composants. Par ailleurs, en cas d'utilisation de superplastifiant, l'influence des fines sur l'ouvrabilité devient positive. Le superplastifiant par son rôle de défloculation des fines, libère leur mouvement au sein du mélange au profit de l'ouvrabilité. Cependant de nombreuses études ont montré que l'incorporation de 5 à 10 % de fines calcaires améliore l'ouvrabilité [Ramirez, 1987].

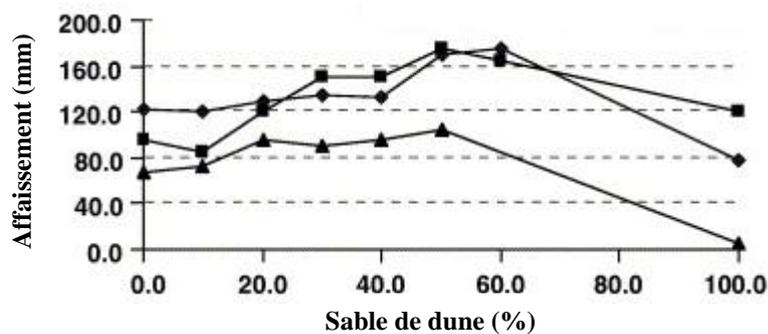


Figure 3.1: Evolution de la maniabilité de béton formulé avec trois sable de dune [El-Harthy, 2007]

3.2.3.2. Masse Volumique et teneur en air

La masse volumique est la masse par unité de volume d'un béton. L'essai est effectué conformément à la norme NA 436. Quand le béton est fabriqué avec des granulats de densité normale, sa propre masse volumique varie généralement dans une plage allant de 2 à 2.5 t/m³. L'évaluation quantitative de l'air occlus sert non seulement à connaître la composition exacte d'une unité de volume de béton, mais elle permet aussi de prédire les propriétés mécaniques du béton durci. L'air occlus affecte en effet la résistance à la compression, au même titre que le volume d'eau, comme il est clairement mis en exergue par la relation de Féret. La quantité de cet air varie dans un béton ordinaire entre 1 et 2.5 % du volume total [Baron, 1996].

3.2.3.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression est généralement considérée comme la propriété la plus importante du béton, car elle projette généralement une image globale de sa qualité puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté [Neville, 2000]. Elle est définie par des essais de compression simple à 28 jours d'âge, sur des cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre ou sur des éprouvettes cubiques.

Il est notoire que la résistance du béton est étroitement liée à son rapport E/C. Plus ce rapport est réduit plus la résistance augmente [Neville, 2000]. Cependant, une multitude de facteurs ont autant d'influence sur R_c que E/C. A commencer par les fines, qui introduits à un taux optimal dans la composition du béton, influe positivement sur la résistance par l'amélioration de sa compacité [Baron, 1996]. En effet, ils viennent combler les vides intergranulaires, réduisant ainsi la porosité du béton. L'usage d'adjuvant en présence de fines est souvent préférable pour pallier au problème de perte d'ouvrabilité causé par ces fines. Car effectivement l'augmentation de cette fraction induit un besoin en eau supplémentaire, pour une même consistance, ce qui causera une chute de résistance. Jumeler fines et adjuvant conduit à un béton plus compact avec une même quantité d'eau et donc avec des performances améliorées.

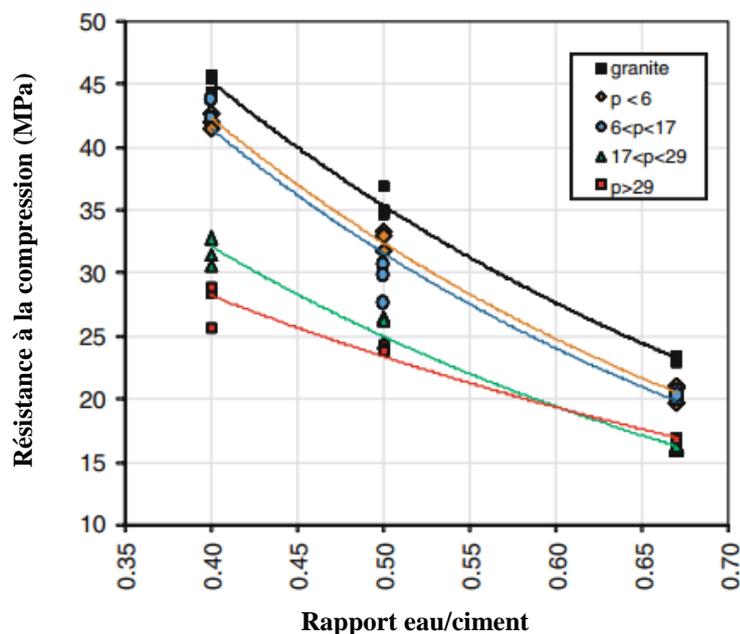


Figure 3.2: Variation de R_c en fonction de E/C et l'absorption « p » des granulats [Angulo, 2010]

La nature, la forme, l'absorption des granulats (figure 3.2), les performances mécaniques et la finesse du ciment sont d'autres paramètres qui influent la résistance du béton.

3.2.3.4. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction du béton, désignée par R_t ou R_f (en cas d'essai de flexion), est difficilement estimée par un essai de traction direct qui est techniquement délicat pour fixer l'éprouvette d'un côté, et les résultats obtenus sont très dispersés de l'autre. La faible résistance à la traction des bétons fait que la rupture se produit généralement aux extrémités et il est difficile d'éviter des contraintes secondaires telles que celles induites par des mâchoires ou par des ancrages noyés. Malgré que la résistance à la traction soit négligeable, son estimation aide à comprendre le comportement du béton armé et à estimer la charge qui entrainera l'apparition de fissures, nuisible à la durabilité du béton.

R_f est influencée par plusieurs paramètres. Un gravillon concassé influe positivement sur la résistance par flexion du fait que l'aréole de transition, appelé aussi interface pâte granulat, est plus résistante que dans le cas d'un gravillon rond lisse et donc l'adhérence pâte-granulat est améliorée. La granulométrie des intrants inertes, la cure, l'âge de murissement du béton sont autant de facteurs qui influent cette caractéristique de la même manière qu'ils influencent la résistance à la compression. Sauf que R_f est plus sensible à un mûrissement inadéquat, vraisemblablement parce que les effets du retrait dans les éléments soumis à la flexion sont très importants.

3.2.3.5. Perméabilité des bétons

La perméabilité K d'un matériau caractérise sa disposition à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression, figure 3.3 [Baron, 1996].

Q = Débit volumique d'un fluide de viscosité μ

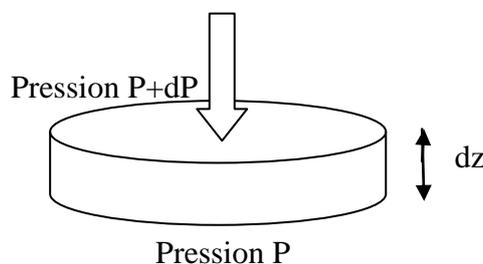


Figure 3.3: Définition de la perméabilité

K est défini par la relation de Darcy qui exprime le débit volumique Q d'un fluide de viscosité μ qui traverse une épaisseur dz de matériau de section apparente A sous la différence de pression dP [Neville, 2000] :

$$Q = - (K/\mu).A.dP/dz$$

Cette relation suppose un régime d'écoulement laminaire dans les pores du matériau.

La durabilité du béton est étroitement liée à sa perméabilité qui fait intervenir l'écoulement des fluides, liquide ou gaz, à travers sa microstructure. Cet écoulement provoqué par un gradient de pression dépend de la porosité du matériau, des dimensions, de la distribution, de la forme et de la continuité ou non des pores, figure 3.4. A savoir que le coefficient de perméabilité décroît considérablement avec la réduction du rapport E/C. En effet, pour les rapports E/C passant de 0.75 à 0.26, le coefficient décroît de quatre fois [Neville, 2000]. Il est considéré que la perméabilité est importante pour les bétons ayant des E/C supérieurs à 0.4, cette lacune a des conséquences sur la pénétration des ions agressifs à l'intérieur du béton. A ajouter que la finesse du ciment réduit aussi la perméabilité. De manière générale, il est considéré que la perméabilité est d'autant plus faible que la pâte de ciment est résistante. Le ciment et l'eau constituent les paramètres les plus influents sur la perméabilité du béton. L'influence des granulats est considérée comme étant faible, du fait qu'ils sont enrobés par la pâte de ciment, dans un béton correctement serré, c'est la porosité de la pâte de ciment durci qui exerce la plus grande influence. Larbi (1993) a trouvé que, bien que la porosité à l'interface pâte-granat soit plus élevée, la perméabilité du mélange dépend de la masse interne de la pâte de ciment, qui représente la seule phase continue dans le béton. Cette interprétation est corroborée par le fait que la perméabilité d'une pâte de ciment est proche de celle d'un béton contenant la même pâte [Hall, 1989]. D'autre part, les pores des granulats ne sont pas interconnectés habituellement et ils sont enrobés par la pâte de ciment de sorte que leurs pores ne participent pas à l'écoulement des fluides. Néanmoins, selon Dreux Gorisse, le module de finesse des sables a une influence sur la perméabilité ce qui met en exergue l'importance du sable sur la durabilité du béton.

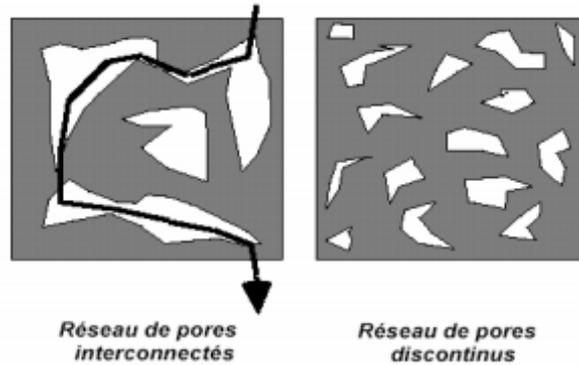


Figure 3.4: Influence de l'interconnectivité des pores sur la perméabilité de la pâte

A préciser que la perméabilité décroît rapidement avec le durcissement du béton du fait que le gel produit par l'hydratation du ciment remplace et obstrue les vides occupés par l'eau. Le mode de cure a aussi son influence sur cette caractéristique, comme le montre la figure 3.5. Une cure correcte avec une période d'humidification suffisante permet une hydratation et mûrissement adéquat réduisant ainsi la présence de fissures dans le béton et diminuant la perméabilité.

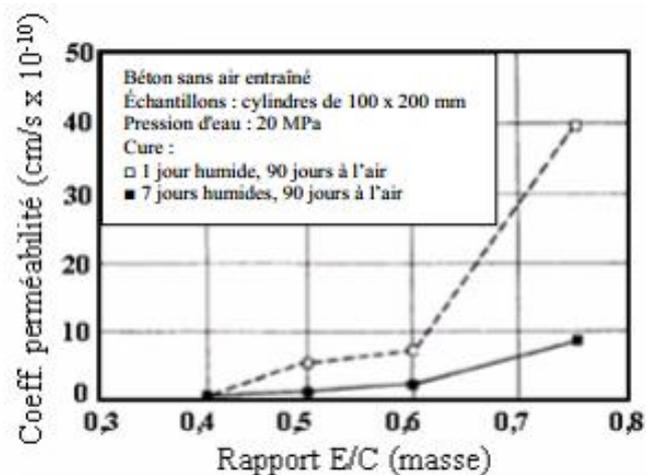


Figure 3.5: Influence de la cure sur la perméabilité du béton [Desmettre, 2011]

3.2.3.6. Absorption d'eau des bétons

L'absorption sert à estimer, ne serait-ce que sommairement, la porosité du béton. Elle se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette de béton jusqu'à stabilisation du poids puis l'immerger dans l'eau et en mesurant le pourcentage d'augmentation de masse. La plupart des bons bétons ont une absorption inférieure à 10 %.

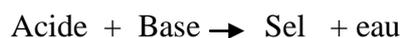
D'un point de vue pratique, c'est l'absorption de surface, appelé aussi absorption par capillarité, qui présente plus d'intérêt (les armatures de béton sont proches de la surface). Pour sa mesure, les éprouvettes de béton sont mises en contact avec une fine nappe d'eau pendant 24 heures. Le taux d'absorption capillaire est exprimé en millimètre par mètre carré par seconde. Un tel essai mesure l'absorption d'eau par succion capillaire d'un béton mis en contact avec de l'eau, mais sans pression hydraulique donc plus proche de la réalité.

3.2.3.7. Résistance du béton aux acides

La détérioration du béton provient le plus souvent de son attaque par les agents chimiques (acides ou salins) contenus dans l'eau avec laquelle il est en contact, qui dissolvent la chaux du ciment en formant des composés nouveaux entraînant l'érosion, le gonflement et l'éclatement du béton. De manière globale, le béton résiste bien aux attaques acides si sa formulation et sa mise en place sont correctement effectuées. Les acides organiques (acétique, tannique, lactique, formique) sont des acides faibles qui donnent des composés de calcium solubles. Ils sont moins agressifs que d'autres. Les acides gras provenant des huiles et graisses végétales, certains acides humiques provoqués par la décomposition des végétaux sont également des acides faibles peu agressifs.

Cependant, des exceptions existent où le béton ne résiste pas aux attaques des acides typiquement forts. Les nouveaux composés produits, éventuellement solubles, peuvent être lessivés et nuire à la pérennité des ouvrages par érosion. La chaux (Ca(OH)_2), libérée lors de l'hydratation du ciment, est l'hydrate le plus vulnérable, mais les C-S-H (silicate de calcium) et les granulats calcaires peuvent aussi être attaqués.

Globalement, la réaction de base qui se produit entre acides et bases (béton) conduit à la formation de sel comme suit :



L'agressivité de l'acide est tributaire de la solubilité du sel produit. Sa dissolution conduit à l'érosion de la pâte de ciment (figure 3.6), dans le cas contraire, il se substitue à la chaux et forme une couche protectrice.



Figure 3.6: Prisme de mortier dont la partie droit a subi l'attaque d'un acide

Ces produits nocifs peuvent provenir des pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH compris entre 4.0 et 4.5 pouvant provoquer la dégradation de la surface exposée du béton. La pâte de ciment durci est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton. L'acide sulfurique est particulièrement plus agressif [Monteny, 2000], parce que, outre l'attaque des sulfates de la chaux donnant lieu à la formation d'autres C-S-H (induisant un gonflement), l'acide attaque la phase alumineuse. Des mesures spécifiques en ayant recours à des ajouts minéraux atténuent de son agressivité [Makhloufi, 2012].

3.2.3.8. Résistance au sulfate

Des bétons en contact avec des sols ou de l'eau ayant une teneur élevée en sulfate peuvent subir des dégradations majeures (figure 3.7). Les sulfates attaquent le béton en réagissant avec les produits d'hydratations du liant spécialement avec les hydrates de calcium aluminates pour former de l'ettringite (sulfonâtes de calcium) expansif qui peut provoquer suffisamment de pression pour causer des fissures. Il existe très fréquemment du sulfate de sodium, de potassium, de magnésium et de calcium dans les sols et les eaux souterraines. Sous certaines conditions particulières (température inférieure à -5°C), l'attaque par les sulfates conduit à la cristallisation d'un minéral non expansif (thaumasite), qui affaiblit tout autant les caractéristiques mécaniques du béton [Neville, 2004].



Figure 3.7: Dégradation d'un pilonne d'un pont en contact avec sol riche en sulfate

L'attaque du béton par les sulfates se manifeste le plus souvent par un gonflement du béton dans sa masse, accompagné d'une fissuration importante (figure 3.8).



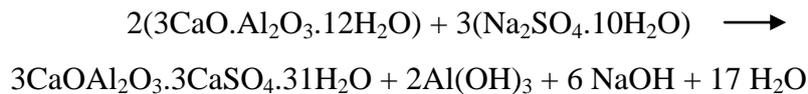
Figure 3.8: Augmentation de volume (gonflement) d'un prisme de mortier maintenu dans une solution à haute teneur en sulfate

Les réactions chimiques des sulfates avec la pâte de ciment sont diverses et varient selon la nature du sulfate en action et peuvent se résumer comme suit :

- Sulfate de sodium attaquant la chaux et les aluminates :



Cela constitue une attaque de type acide avec formation de sel (NaOH). Cette réaction ne provoque pas un gonflement. Le sulfate de sodium réagit aussi avec l'aluminate de calcium hydraté pour former un sulfonate de calcium ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) connu sous le nom d'ettringite souvent destructrice par expansion, puisqu'elle survient dans la pâte durcie. La réaction est comme suit :



- Sulfate de magnésium attaque les hydrates de silicate de calcium, la chaux et les aluminates:



L'attaque par les sulfates de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates. Une détérioration du béton. La conséquence finale de l'attaque du sulfate de magnésium est la destruction totale des C-S-H.

Les conséquences de l'attaque par les sulfates ne se limitent pas à une expansion destructrice et à la fissuration, mais provoquent aussi des chutes de résistances du béton due à une perte de cohésion de la pâte de ciment hydraté et une désagrégation de la zone d'interface entre pâte et granulat. L'agressivité de l'attaque du béton par les sulfates est amoindrie pour les rapports de eau/ciment et les capillarités faibles [Neville, 2004].

La résistance du béton à l'attaque d'agents agressifs, de manière générale, peut être évaluée en laboratoire en conservant les éprouvettes dans des solutions contenant de l'acide ou du sulfate. Les effets de cette exposition peuvent être évalués par la perte de résistance des éprouvettes, par leur allongement, par leur perte de masse ou peuvent même être évalués visuellement.

3.3. Les bétons autoplaçants (BAP)

3.3.1. Définition et avantages des BAP

Les bétons autoplaçants (BAP) sont apparus au Japon à la fin des années 1980. L'élaboration de ces bétons représente un saut technologique important dans l'évolution des techniques de mise en œuvre, en remplacement des techniques classiques des bétons vibrés. Ces bétons se caractérisent par une grande fluidité et une bonne stabilité, une forte résistance à la ségrégation et au ressuage, une mise en place sous le seul effet de la gravité et une aptitude à s'écouler sans vibration dans des coffrages complexes et des ferraillements denses tout en

donnant un aspect final homogène. Grâce à leur formulation et à leur homogénéité, ils donnent des structures résistantes et durables.

Ces bétons se caractérisent par les intérêts technico-économiques suivants :

- amélioration de la sécurité ;
- gain de productivité ;
- possibilité de réaliser des éléments de géométrie complexes et/ou très ferrailés ;
- diminution du temps de personnel lors de la mise en place du béton en chantier ;
- obtention d'une meilleure qualité du béton indépendante du savoir-faire des ouvriers, avec une finition soignée ;
- réduction de la nuisance sonore sur chantier suite à l'élimination de la vibration.

Ils demandent cependant des précautions particulières, comme :

- renforcer les coffrages ;
- préciser les règles d'emploi ;
- prévoir des méthodes de contrôle adaptées,
- surcoût du béton qui demande plus de ciment et des adjuvants.

3.3.2. Propriétés des BAP à l'état frais

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais.

L'ouvrabilité de ces bétons se décompose en trois caractéristiques principales :

- mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

Pour évaluer les propriétés et les qualités d'un BAP à l'état frais (déformabilité, stabilité et capacité de remplissage), plusieurs essais, normalisés ou non, ont été mis au point. L'essai le plus utilisé est l'essai d'étalement. Il s'effectue avec le cône d'Abrams. On mesure le diamètre moyen de la galette de béton obtenue une minute après le soulèvement du cône. En général, une valeur de 60 à 70 cm est visée pour un BAP. On mesure parfois aussi la vitesse

d'écoulement qui est le temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Il donne une indication sur la viscosité du matériau (une valeur typique de 4 à 10 secondes est attendue). Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non.

3.3.3. Propriétés des BAP à l'état durci

En plus des essais de performance mécanique et de durabilité sur les bétons conventionnels, d'autres essais sur les BAP durcis visent à vérifier l'homogénéité des propriétés du matériau en place. Il s'agit d'essais mécaniques sur carottes, de comptage des granulats sur des éprouvettes sciées en deux pour estimer la ségrégation, d'essais d'arrachement d'armatures à différentes hauteurs d'une structure donnée, etc...

3.3.4. Méthode de formulation des BAP

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Deux grandes familles prévalent actuellement :

- la première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [Nepomuceno, 2014]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

Il en a découlé plusieurs méthodes de formulation, nous citons les plus répandues:

- la méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires ;
- la méthode basée sur l'optimisation des mortiers ;
- la méthode chinoise ;
- la méthode basée sur l'optimisation de la pâte.

La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires a été développée au LCPC et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible, MEC, du squelette granulaire [Sedran, 1999]. Elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le compose (forme, granulométrie). L'exploitation de cette méthode nécessite l'acquisition du logiciel (Betonlab Pro), ce qui présente un inconvénient majeur dans certains laboratoires.

La méthode d'optimisation des mortiers, proposée initialement par des chercheurs Japonais [Nepomuceno, 2014], est également nommée Méthode Japonaise. Elle permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats et sur-dosés en liant. Ils sont économiquement peu viables et peuvent conduire à des problèmes de retrait.

En parallèle, Su N. et al. [Su, 2001] ont proposé une nouvelle méthode pour formuler le BAP basé, au début, sur la compacité des granulats (sable et gravier) et, puis, sur le remplissage des vides des granulats avec la pâte. Cette méthode référée en tant que méthode chinoise comparée à la méthode japonaise est plus simple, plus facile pour l'exécution et moins onéreuse. Sauf qu'elle utilise une relation empirique pour estimer le dosage en ciment fondé sur des données empiriques locales. Elle ne peut pas donc être appliquée dans d'autres régions.

La méthode de l'optimisation de la pâte a tendance à trouver le volume de pâte minimum nécessaire pour répondre aux critères des BAP [Nepomuceno, 2014]. Elle permet ainsi l'optimisation du coût des BAP.

3.3.5. Spécificités de formulation des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

3.3.5.1 Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont sources de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité de remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³). Le rôle de cette quantité de pâte élevée est d'augmenter la capacité de remplissage, écarter les granulats les uns des autres et annuler les frictions et les collisions inter-granulaires et de réduire le rapport eau/liant afin de limiter la ségrégation et de réduire le tassement et le ressuage. Un rapport eau/liant de 0,3 à 0,5 est recommandé.

3.3.5.2. Importante quantité de fines

Les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons ordinaires dans le but d'assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage. Pour éviter une élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voir ternaire : ciment portland mélangé à des cendres volantes qui améliorent la rhéologie du béton, du laitier de haut fourneau qui est supposé améliorer la maniabilité, des fumées de silice qui augmentent la résistance à la ségrégation et/ou des fillers calcaires qui réduisent la demande en eau pour une maniabilité fixée.

Les paramètres recommandés de formulation des BAP [AFGC, 2000], sont rappelés ci-après:

- quantité de liant compris entre $380 \leq L \leq 600$ kg ;
- rapport G/S compris entre $0.8 \leq G/S \leq 1.1$;
- rapport S/(G+S) compris entre $0.5 \leq S/(G+S) \leq 0.57$;
- volume de gros granulat par unité égal à $0.27 \leq V_g \leq 0.36$;
- volume de mortier par unité compris entre $0.65 \leq V_m \leq 0.75$;
- rapport eau/liant de l'ordre de $0.30 \leq E/L \leq 0.45$;
- rapport eau/ciment compris entre $0.50 \leq E/C \leq 0.60$.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure 3.9) [Billberg, 2001].

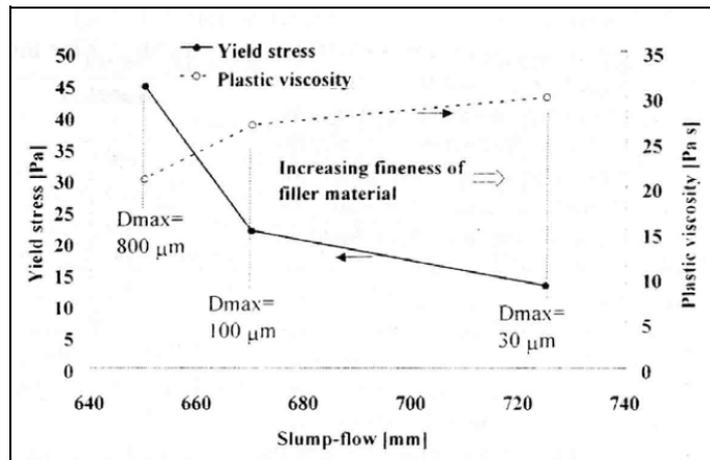


Figure 3.9 : Finesse d'un filler et le comportement rhéologique de BAP [Billberg, 2001]

3.3.5.3. Usage de superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Ils permettent d'obtenir la fluidité souhaitée tout en minimisant la teneur en eau. Par conséquent, ils améliorent la stabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons en créant un phénomène de dispersion des particules.

La dispersion suscitée provient de du fait que le superplastifiant interagisse avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [Baron, 1996].

3.3.5.4. Utilisation d'agent de viscosité

Les agents de viscosité sont des agents colloïdaux dérivés des celluloses, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure 3.10). Leur rôle est d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégations des granulats en rendant la pâte plus épaisse. Ces produits sont fréquemment utilisés pour empêcher le délavement à l'état frais des bétons coulés sous

l'eau, ou comme agent de pompage, pour augmenter la résistance à l'affaissement du béton projeté. Ils se présentent en général sous forme de poudre et sont mélangés soit aux matériaux secs, soit avec une partie de l'eau de gâchage. Un dosage de 0.01 à 0.08 % de la masse d'eau est recommandé.

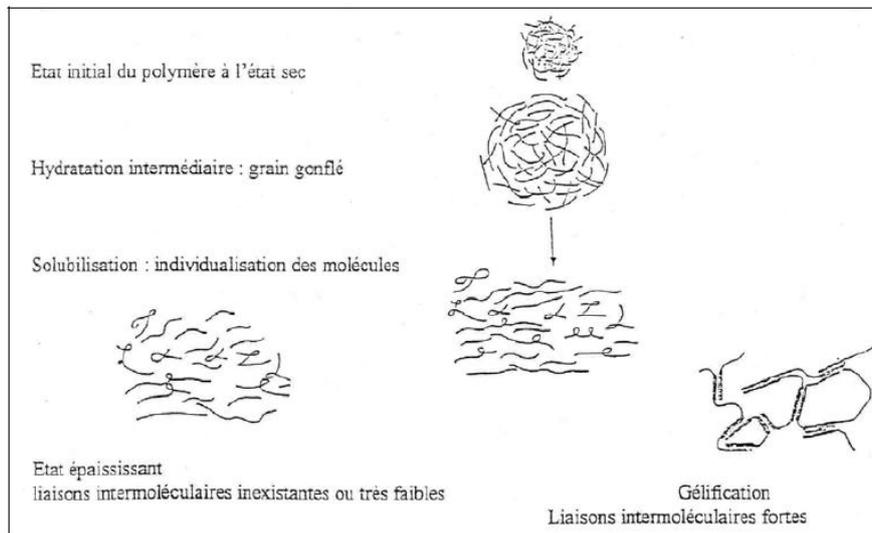


Figure 3.10 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Assié, 2004]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure 3.11).

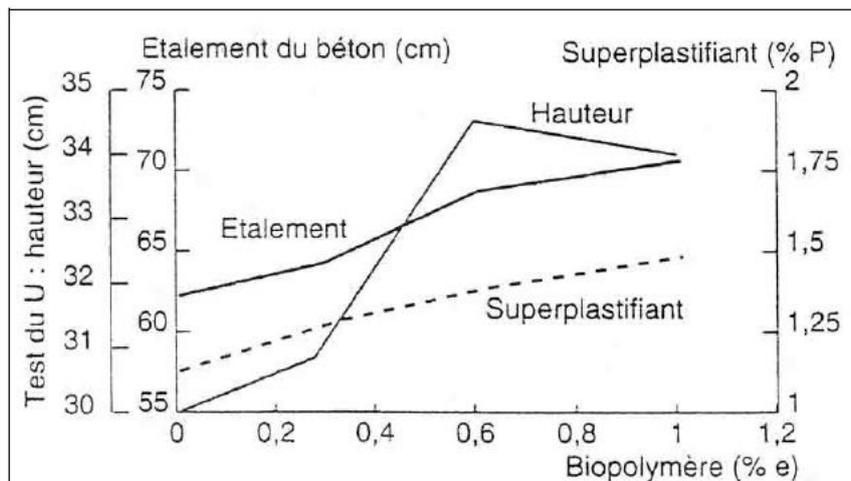


Figure 3.11: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, [Assié, 2004]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [Sedran, 1995].

3.3.5.5. Gravillon

Pour les BAP, il est souhaitable d'utiliser un faible volume de gravillon car ces derniers sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. En général, le diamètre maximal D_{max} des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Le choix d'un diamètre plus grand est possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible. En général, le rapport gravillon/sable est de l'ordre de 1.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure 3.12). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

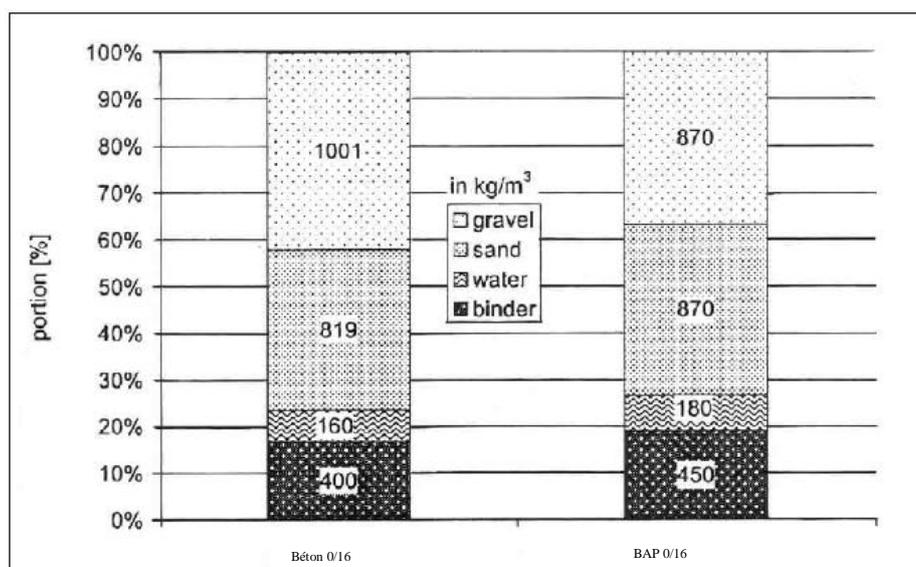


Figure 3.12: Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton ordinaire

3.3.6. Utilisation des plans d'expériences pour la formulation des BAP

La méthode des plans d'expériences, notamment, le Plan factoriel est largement utilisée dans les expériences impliquant de nombreux facteurs. Elle permet d'étudier l'effet conjoint des paramètres ou facteurs sur les réponses ou les variables dépendantes, et d'élaborer des modèles applicables à la conception et au développement d'expériences. Cette méthode peut s'avérer très intéressante pour la formulation des BAP, du fait que ce type de béton fait appel à beaucoup plus de paramètres que les bétons ordinaires. D'ailleurs, c'est pour cette raison que plusieurs chercheurs ont recouru à l'utilisation de cette méthode pour tenter de mettre au point des modèles mathématiques liant les paramètres de formulation aux divers résultats obtenus, nommés conformément au vocabulaire typique de la méthode « réponses ». Le but étant, en plus d'essayer d'établir des modèles fiables aidant à la formulation, comprendre l'influence des facteurs et les éventuelles interactions qui peuvent exister entre eux.

Dans ce contexte, Khayat et al. (1999) ont utilisé le plan composite central avec surface de réponse en considérant cinq facteurs : rapport E / C (de 0,37 à 0,5), la teneur en ciment (360 à 600 kg / m³), dosage d'agent de viscosité (de 0,05 à 0,20% en masse d'eau), pourcentage de superplastifiant (0,30 à 1,10% en masse de liant), le volume des gravillons (240 à 400 kg / m³) et le volume de sable nécessaire pour atteindre un volume absolu. Les réponses étudiées étaient l'étalement, la capacité de remplissage, l'essai à l'entonnoir et la résistance à la compression à 7 et 28 jours. Les modèles obtenus ont permis une meilleure compréhension des interactions éventuelles entre facteurs et la possibilité de comparer les réponses obtenues à partir de diverses méthodes d'essai.

Al Qadi Arabi et al. (2009) ont utilisé la méthode des plans d'expériences, basée sur la statistique, pour modéliser l'influence des paramètres clés, notamment le dosage en ciment, le rapport eau/liant et du superplastifiant, sur les propriétés à l'état durci du BAP. Les modèles étaient valables pour un large intervalle de dosage des facteurs considérés. Cette modélisation numérique pourrait être utile pour réduire le nombre d'essais pour l'optimisation des BAP. Les chercheurs ont conclu que les modèles quadratiques complets sont les meilleurs pour toutes les réponses.

Soudki et al. (2001) ont présenté les résultats d'une analyse statistique visant à optimiser la formulation d'un béton destiné à une utilisation en climats chauds. Un plan factoriel complet de quatre facteurs (dont les niveaux sont respectivement 3 x 4 x 4 x 3) a été élaboré. Les

influences des facteurs sur la résistance en compression, notamment, du rapport eau / ciment (0.40, 0.50, 0.60), du rapport gravillon/ gravillon + sable (0.55, 0.60, 0.65, 0.70), du taux des granulats / ciment (3.0, 4.0, 5.0, 6.0) et la température (24, 38, 52 ° C), ont été caractérisées et analysées à l'aide de la régression polynomiale. Les modèles polynomiaux ont été mis au point pour la résistance du béton en fonction de la température et de la proportion des constituants. La combinaison optimale de béton à différentes températures, ainsi que le mélange le moins sensible aux variations de température ont été déterminés.

Al Qadi et al. (2013) ont utilisé un plan factoriel complet avec surface de réponse ayant un point central pour continuer le travail qu'ils ont entrepris précédemment et développer des modèles quadratiques. Le plan utilisé était basé sur quatre facteurs : teneur en ciment, rapport E/C, dosage en cendre volante et superplastifiant. Les réponses examinées sont l'ouvrabilité et la résistance à la compression du BAP avec cendre volante. Il a été mis en exergue que les interactions entre ciment – superplastifiant, E/C – superplastifiant, superplastifiant – cendre volante et entre ciment – cendre volante – superplastifiant, sont les seuls effets significatifs dans le modèle quadratique adopté. L'obtention de résistance à la compression maximale est recommandée avec les niveaux supérieurs de tous les facteurs considérés. D'autres types de plans ont été utilisés par les chercheurs pour l'optimisation des BAP, tel que le plan de Taguchi [Ozbay, 2009 ; Simsek, 2013] et le plan des mélanges destinés à l'optimisation de la pâte [El Barak, 2005].

Cette voie des plans d'expériences reste très prometteuse et les recherches se poursuivent pour mieux comprendre les effets des composants sur les BAP et probablement trouver une méthode de formulation qui fera le consensus de toute la communauté scientifique spécialisée dans le domaine.

3.4. Conclusion

Le béton reste le matériau le plus utilisé dans notre ère pour construire. Cela est dû à plusieurs facteurs parmi lesquels compte sa mise en place facile s'adaptant à toutes les formes et la disponibilité et le faible coût des constituants. Concernant ces derniers, les recherches de nouvelles ressources sont toujours à l'ordre du jour. La demande de matières premières est tel, que de nouveau composant alternatif son nécessaire pour combler le déficit qui peut survenir avec les quantités importantes de béton à confectionner. Les matériaux de substitution peuvent être inertes s'ajoutant aux granulats (sable calcaire, sable de dune, déchets de

construction recyclés, tuf calcaire dans notre cas,...), ou réactifs se substituant au ciment (laitier granulé de hauts fourneaux, métakaolin, ...). L'essentiel est que la formulation du béton doit répondre aux exigences d'ouvrabilité, de résistance et de durabilité. C'est un compromis dont l'atteinte s'obtient par un choix judicieux des constituants introduits à des dosages adéquats.

Concernant la formulation des bétons ordinaires, il existe plusieurs méthodes basées essentiellement sur la formule de Féret, reliant la résistance du béton au dosage en ciment et au pourcentage des vides. Cependant, la méthode de Dreux – Gorisse sort du lot et se distingue par sa nature empirique et pratique qui lui a permis une utilisation élargie.

En parallèle, les recherches sur le béton se sont multipliées. Dès lors, les dernières décennies ont vu la naissance de nouveaux bétons aux performances sans commune mesure avec celles qu'on prête habituellement à ce matériau. L'année 1986, par exemple, était l'année de la première apparition du BAP. Ce nouveau béton très fluide, ouvre de nouveaux horizons en offrant une multitude de possibilités grâce à sa mise en place sans vibration et sa grande capacité de remplissage. Ce béton est relativement jeune dont la formulation se caractérise par certaines spécificités (volume de pâte élevé, D_{max} réduit, usage de superplastifiant, etc...). Les méthodes de formulation sont multiples sans qu'il y ait consensus sur une méthode précise. Les recherches sont d'actualité sur cet axe. La méthode des plans d'expériences est une nouvelle tendance très utilisée pour optimiser les BAP. Les intérêts se focalisent sur cette méthode du fait que la formulation de ces bétons est plus pointue que celle des BO par la considération d'un nombre plus important de paramètres. Elle permet de faire varier ces facteurs simultanément avec l'étude de plusieurs réponses (résultats rhéologiques ou mécaniques du matériau) en même temps. Les avantages procurés par cette méthode sont essentiellement le gain du temps et la réduction du nombre des essais tout en permettant une modélisation mathématique des réponses en fonction des paramètres de départ. Elle sera exploitée ultérieurement dans cette recherche pour une mise en relief de l'effet d'ajout du tuf calcaire sur les performances d'un BAP, dans le but d'une valorisation plus large de ce matériau local.

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATIONS DES BETONS

4.1. Introduction

L'objectif de cette investigation expérimentale vise à étudier la faisabilité d'utilisation des tufs calcaires dans la fabrication du béton. Le travail entrepris est scindé en deux parties. La première partie concerne l'introduction du tuf par substitution partielle au sable dans la formulation de béton usuel. Ce dernier est défini par une résistance à la compression supérieure à 25 MPa et un affaissement plastique, autour de 10 cm, conformément à ce qui d'usage dans nos chantiers. La caractérisation de ces bétons englobe l'évaluation des performances à l'état frais, à l'état durci et en milieu agressif [Cherrak, 2011].

La deuxième partie concerne la valorisation des tufs calcaires dans les bétons autoplaçants. Le pourcentage de fines élevé dans ces matériaux, pénalisant dans le cas des bétons usuels, peut constituer un avantage dans le cas des BAP, où le pourcentage de fines est supérieur à l'usuel. Dans cette partie, l'optimisation des BAP se fera par application de la méthode des plans d'expériences.

Les détails des matériaux employés dans cette recherche ainsi que les compositions des bétons étudiées seront présentés dans ce chapitre.

4.2. Caractérisation des matériaux de base

Les matériaux concernés par cette investigation sont des matériaux couramment utilisés dans les chantiers algériens, en l'occurrence des gravillons concassés de nature calcaire, un sable d'oued et un ciment CPJ. L'originalité de l'étude réside dans le fait qu'il sera introduit dans la formulation des différents bétons, le matériau tuf calcaire comme matériau de substitution au sable.

4.2.1. Tufs

La diversité et la variété des tufs calcaires en Algérie ont fait que le choix du tuf pour la mise en application de cette recherche n'a pas été évident. L'échantillon choisi doit être représentatif pour pouvoir prétendre à l'obtention de résultats généralisables et valables pour ce matériau quelle que soit sa provenance. Pour ce faire, un travail de collaboration le Ministère des Travaux Publics, Direction de l'Entretien et de l'Exploitation (M.T.P) et le

Laboratoire Central des Travaux Publics [L.C.T.P, 2006], qui ont eu l'amabilité de nous permettre l'exploitation de leur base de données sur les matériaux locaux (pour s'assurer qu'il s'agit réellement de tuf calcaire et non pas d'un tuf gypseux dont l'utilisation est prohibée dans le béton).

L'examen des données mis à notre disposition, a fait ressortir que les tufs calcaires se distinguent entre eux essentiellement par leur taux de fines et leur caractéristique géotechnique (I_{CBR} , W_{OPT} , % $CaCO_3$). Dans le cadre de cette recherche, seul le taux de fines peut constituer un critère de choix vu son influence sur les performances du béton. Les caractéristiques géotechniques ne présentent pas d'intérêt, leur exploitation étant réservée pour la réalisation de chaussées. Les tufs ayant un pourcentage de fines entre 25 et 35 % sont prédominants à hauteur de 60% des gisements répertoriés par le LCTP.

A cet effet, deux échantillons de ce matériau dans ces plages prépondérantes ont été considérés, à savoir celui de Boughezoul avec 27 % de fines et celui de Htattba à 34 % de fines.



(a) Tuf de Htattba



(b) tuf de Boughezoul

Figure 4.1 : Tufs calcaires utilisés

Pour les besoins de l'étude, ces deux matériaux représentatifs ont fait l'objet d'une caractérisation chimique (essais classiques et DRX) afin d'évaluer le taux de calcaire qu'ils renferment. Les deux tufs de Htattba et de Boughezoul ont des compositions chimiques quasiment comparables avec des teneurs respectives de 38 et 40% en chaux (CaO) et de 27 et 21 % de silice (SiO_2), tableau 4.1. Les pourcentages cumulés de CaO et PF conduisent à la détermination de taux de calcaire que contient chacun des deux tufs. Ce taux est égal à environ 61 et 74 respectivement pour le tuf de Htattba et celui de Boughezoul.

La caractérisation physique, dont les résultats sont regroupés dans le tableau 4.1, indique un module de finesse et un taux d'absorption non-conformes aux seuils prescrits par les spécifications des normes en vigueur applicables aux sables pour béton [NA 5113 ; EN 12620]. Ceci interdit l'utilisation du tuf dans le béton en tant que sable, seule son utilisation en tant que substitut partiel au sable grossier est possible.

Tableau 4.1 : Caractéristiques physique et chimique des tufs calcaires utilisés

Caractéristiques physiques	Tuf de Htattba	Tuf de Bougezoul
Masse volumique apparente ρ_a (kg/m ³)	1100	1120
Masse volumique absolue ρ_s (kg/m ³)	2100	1950
Module de finesse MF	1.24	1.78
Absorption Abs (%)	11	6
Valeur au bleu Vb	0.9	0.5
Taux de fines < 63 μm (%)	34	27
Composition chimique		
SiO ₂	26.69	21.16
Al ₂ O ₃	2.54	1.43
Fe ₂ O ₃	2.14	0.68
CaO	36.68	44
MgO	0.61	1.34
SO ₃	0.13	0.56
K ₂ O	0.38	0.10
Na ₂ O	0.08	0.15
P ₂ O ₅	0.07	0.04
TiO ₂	0.12	0.09
PF	16.14	17.59

4.2.2. Granulats

Le sable retenu est un sable d'oued provenant de Baghliia. Ce choix n'a pas été hasardeux, mais plutôt justifié par l'usage du tuf, très riche en fines.

Il a été procédé à son identification par l'élaboration des essais adéquats. Les résultats des essais de caractérisation sont résumés dans le tableau 4.2. Sa courbe granulométrique est représentée sur la figure 4.2.

L'équivalent de sable élevé de 80% indique que le sable est propre. En parallèle, le module de finesse de l'ordre de 3 permet de conclure que le sable choisi est effectivement grossier, comme prédit au départ. Cette spécificité est connue pour ce type de sable d'origine alluvionnaire.

En ce qui concerne les gravillons, deux classes (3/15, 15/25), issus de la carrière d'El Hachimia, ont été utilisées dans cette étude pour la confection des bétons, conformément à ce qui s'utilise couramment dans les chantiers. Ils sont concassés de nature calcaire. Leurs courbes granulométriques de la figure 4.2, montrent leur granularité continue. Leurs caractéristiques physiques, portées sur le tableau 4.2, obéissent aux exigences stipulées dans les normes y afférentes.

Tableau 4.2 : Propriétés des granulats utilisés

	Propriété	Sable	Gravillon 3/15	Gravillon 15/25
ρ_a (kg/m ³)	Masse volumique apparente	1530	1400	1480
ρ_s (kg/m ³)	Masse volumique absolue	2600	2640	2660
LA (%)	Los Angeles	-	26.6	26.3
A (%)	Aplatissement	-	28	26
P _r (%)	Propreté	-	0.15	0.25
M _f	Module de finesse	3,0	-	-
E.S (%)	Equivalent de sable	80	-	-
Ab (%)	Absorption	2,1	-	-

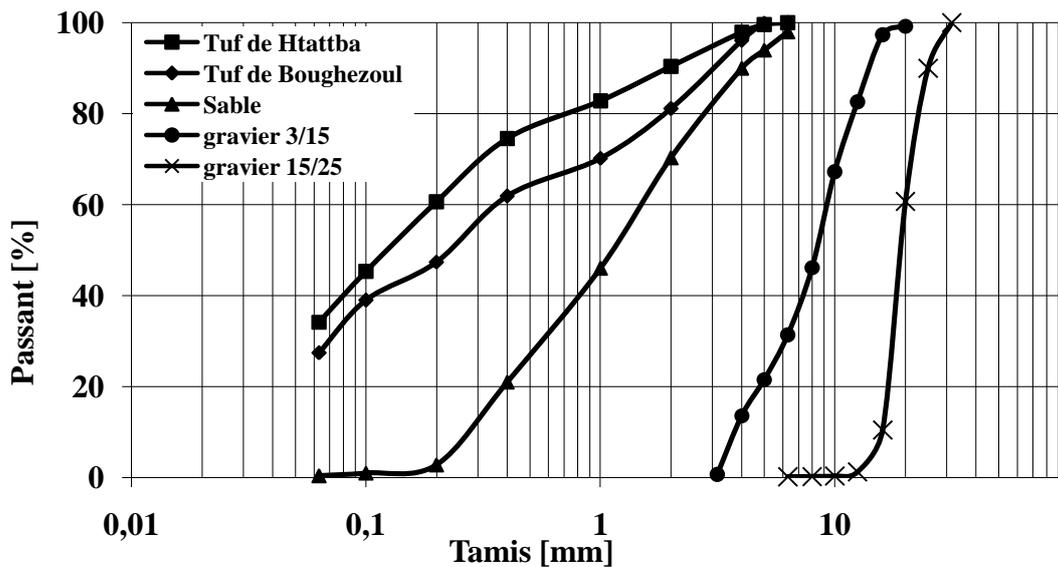


Figure 4.2 : Courbes granulométriques des granulats

4.2.3. Ciment

Le ciment utilisé dans la confection du béton est un ciment avec ajout CPJ CEM II/A de classe 42.5 MPa, provenant de l'usine de M'sila renfermant 15% de fines calcaires comme ajout. Sa surface Blaine est de 3000 cm²/g et ses résistances à 28 jours à la flexion et à la compression sont respectivement égales à 8,5 et 45 MPa pour un rapport E/C de 0,5. Le choix de ce type de ciment se justifie par son utilisation courante dans les chantiers algériens et son

adaptation pour la formulation des bétons usuels. Les caractéristiques chimique et minéralogique, conformes à la norme algérienne NA 442, sont regroupées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Compositions du ciment CEM II/A - 42.5 R

Composition chimique											Composition minéralogique					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	Ins.	PF	CaO libre	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	gypse
20.19	5.23	3.34	56.90	2.01	2.31	0.61	0.15	0.01	4.26	5.84	1.01	60	16	05	13	5

4.2.4. Superplastifiant

Afin de pallier au problème de perte de maniabilité causée par la forte présence de fines dans le tuf calcaire, on a eu recours à l'utilisation de superplastifiant pour la défloculation des fines et l'amélioration de la maniabilité des bétons sans augmentation de la quantité d'eau qui peut porter préjudice aux performances mécaniques.

Le superplastifiant utilisé, MEDAFLOW 30, est de nature liquide, de couleur brune à jaunâtre ayant une teneur en chlorures inférieure à 0,1 % avec une densité 1.10 g/cm³. Son extrait sec est de 30% avec un pH de 6.

4.3. Programme expérimental

L'investigation expérimentale entreprise est scindée en deux parties. La première concerne l'utilisation du tuf calcaire dans le béton usuel par substitution partielle au sable. La deuxième partie concerne la valorisation des tufs calcaires dans la confection de béton auto-plaçant pour tirer profit de leur taux de fines élevé en appliquant la méthode des plans d'expériences.

4.3.1. Formulation des bétons usuels à base de tufs avec et sans superplastifiant

Dans le but d'étudier la faisabilité d'ajout de tuf dans le béton usuel, notamment son influence sur les performances du béton à l'état frais et à l'état durci, il a été procédé à la formulation de neuf (9) bétons dans la globalité, dont un est le béton de référence. Les bétons étudiés sont confectionnés avec des matériaux couramment utilisés dans les chantiers. Ils se distinguent les uns des autres par l'origine du tuf utilisé et le pourcentage de substitution incorporé. En effet, deux tufs sont utilisés, notamment celui de Boughouzoul et celui de Htattba. Ils se

différencient essentiellement par leurs teneurs en fines égale à 34% pour le tuf de Htataba et de 27% pour le tuf de Boughouzoul. Cet ajout est introduit dans la formulation des bétons par substitution partielle au sable grossier à des taux de 5, 15, 25 et 35 %.

Les hypothèses de départ servant à la détermination des compositions par application de la méthode de Dreux-Gorisse, sont une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 25 MPa et un affaissement de 9 cm, le minimum requis pour avoir une ouvrabilité nécessaire pour une mise en œuvre correcte.

Le béton de référence est un béton usuel ne contenant pas de tuf. Ses composantes sont le ciment, les deux gravillons (3/15 et 15/25) et le sable de Baghlia. Il constitue la base des comparaisons qui permettent d'évaluer l'effet de l'ajout du tuf dans le béton.

Les mêmes bétons à base de tufs calcaires ont été confectionnés en ajoutant un superplastifiant. Leurs compositions ont été maintenues inchangées à la différence d'ajout d'adjuvant à des dosages usuels pour ce type de béton, compris entre 0.8 et 1 % du poids de ciment.

L'ensemble de ces bétons usuels à base de tufs a fait l'objet d'une caractérisation à l'état frais et à l'état durci. Cette caractérisation a englobé l'évaluation de la masse volumique, l'air occlus et l'affaissement, pour ce qui se rattache à l'état frais du béton. La caractérisation à l'état durci a concerné l'estimation de la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, ainsi que des essais d'absorption totale et par capillarité et des essais de perméabilité. En complément à cette investigation expérimentale, il a été envisagé d'étudier la résistance des bétons formulés dans des milieux agressifs de différentes natures, notamment des milieux acides et sulfatés. Ceci permettra d'évaluer les dégâts que peuvent encourir les bétons à base de tuf en comparaison avec le béton témoin, vis-à-vis des agressions extérieures. Ces agressions peuvent provenir d'un milieu caractérisé par une acidité élevée ou éventuellement un sol contenant un taux élevé de sulfates. Donc, les agents agressifs envisagés sont : Acide sulfurique, acide chlorhydrique, sulfate de sodium et sulfate de magnésium à des concentrations de 5 %.

L'examen et la synthèse des résultats issus de cette caractérisation permettront de conclure sur l'influence d'ajout de tuf dans le béton usuel.

4.3.2. Formulation des bétons auto-plaçants (BAP)

Il a paru opportun d'exploiter l'utilisation des tufs calcaires dans la formulation de béton auto-plaçant (BAP) pour tirer profit de leurs taux de fines élevés qui constituait un obstacle dans la

formulation des bétons usuels en conduisant à des pertes de maniabilité. Surtout que les BAP nécessitent dans leurs formulations un apport de fines et de pâte supérieur à ce qui est habituellement utilisé pour les bétons usuels. Intuitivement, l'association du tuf et du BAP serait avantageuse et présenterait une bonne synergie. Pour ce faire, il est préconisé d'utiliser la méthode des plans d'expériences, car malgré que les BAP existent depuis les années 80 (ça fait maintenant plus de 30 ans), ils sont encore au stade de la recherche et il n'y a pas de consensus sur une méthode de formulation précise, ajouté à cela le nombre important de paramètres qui peuvent influencer la formulation de ce béton. En effet, le nombre de variables d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expériences est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Le tuf retenu pour cette partie est celui doté du taux de fines le plus élevé. Les facteurs pris en considération sont le taux de tufs introduit, le dosage en ciment et le superplastifiant. La caractérisation de ce béton englobe l'essai d'étalement, le taux de remplissage de la boîte en L, l'essai de stabilisation au tamis et les essais de compression à 28 jours sur des cubes de 15x15x15 cm³.

4.4. Composition des bétons à base de tufs calcaires

L'investigation expérimentale entreprise dans cette étude est scindée en plusieurs parties. En effet, plusieurs bétons ont été composés, dont les étapes sont récapitulées dans ce qui suit :

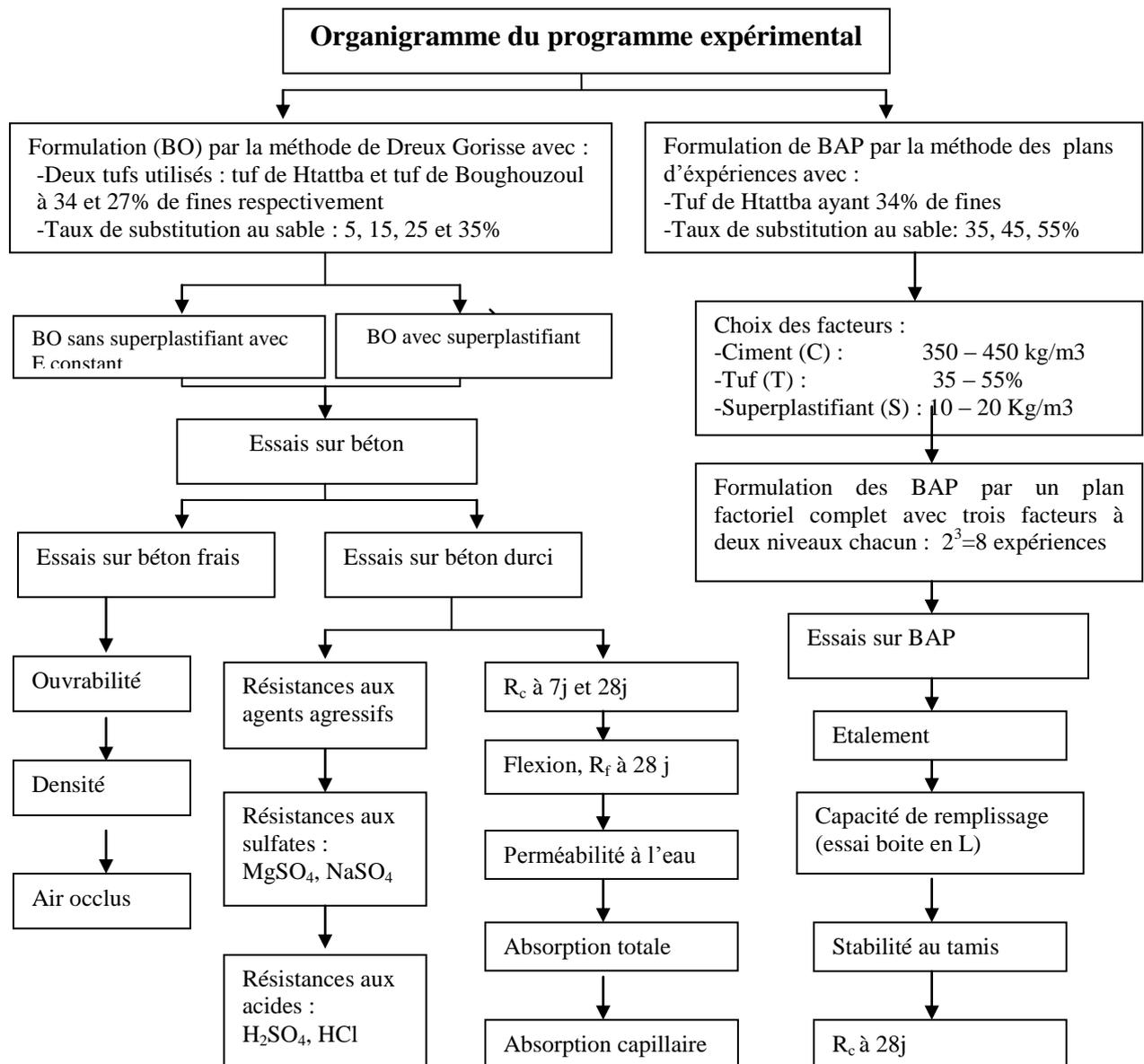
1ère étape : elle concerne la formulation d'un béton de référence sans ajouts de tuf, fait à base de sable grossier de Baghlia. L'utilité de ce béton est de permettre l'élaboration de comparaison afin de mettre en relief l'influence d'ajout de tuf sur les performances du béton.

2ème étape : formulation de bétons usuels avec introduction de tufs calcaires par substitution partielle au sable à hauteur de 5, 15, 25 et 35 %. La quantité d'eau de gâchage est maintenue constante pour les huit bétons formulés.

3ème étape : reformulation de ces mêmes bétons usuels avec tuf calcaire en utilisant un superplastifiant pour améliorer leur maniabilité. Dans cette étape, l'affaissement est maintenu constant pour tous les bétons.

4ème étape : concerne la formulation des BAP avec le tuf de Htattba.

Les détails des formulations des différents bétons sont résumés dans la suite de la section.



4.4.1. Composition des bétons usuels

L'objectif de cette étape est l'étude de l'influence de l'ajout de tufs calcaires sur les performances rhéologiques et mécaniques du béton usuel. Pour ce faire, les bétons ont été formulés à quantité d'eau constante pour pouvoir mettre en relief seule l'influence du tuf calcaire sur l'ouvrabilité et la résistance des bétons. L'application de la méthode de Dreux-Gorisse a permis l'obtention de la formulation du béton usuel de référence, désigné par B0. Les bétons désignés par la lettre «A » sont les bétons à base de tuf de Htattba, ceux désignés par « B » renferment le tuf de Boughezoul. Le chiffre qui suit la lettre désigne le taux de substitution. Les différentes compositions sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.4 : Composition des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant, [kg/m³]

	Béton	Ciment	Eau	Sable	% Tuf	Tuf	Gravillon 3/15	Gravillon 15/25
Tuf de Htattba	B0	400	209.2	633.2	0	0	450	660
	A5	400	209.2	601.54	5	31.66	450	660
	A15	400	209.2	538.20	15	95.0	450	660
	A25	400	209.2	474.90	25	158.3	450	660
	A35	400	209.2	411.58	35	221.62	450	660
Tuf de Boughezoul	B5	400	209.2	601.54	5	31.66	450	660
	B15	400	209.2	538.20	15	95.0	450	660
	B25	400	209.2	474.90	25	158.3	450	660
	B35	400	209.2	411.58	35	221.62	450	660

Les bétons à base de tufs calcaires précédemment formulés, sont repris en utilisant cette fois-ci un superplastifiant. Le recours à l'utilisation de ce produit a été nécessaire pour pallier le problème de perte de maniabilité causé par l'ajout de tufs, précisément le taux élevé de fines qu'ils renferment. Les dosages en superplastifiant introduits varient dans une plage allant de 0.8 à 1.2 % du poids du ciment, dosage usuel pour ce type de béton. Les différentes compositions reprises dans le tableau 4.5, sont désignées comme les précédentes avec ajout de la lettre «S» pour préciser que ce sont des bétons adjuvantés. Les quantités d'eau et de superplastifiant ont été ajustées au cours de l'expérimentation de manière à obtenir la maniabilité escomptée et en évitant la ségrégation. Pratiquement, le dosage de superplastifiant croît graduellement avec le pourcentage de tuf.

Tableau 4.5 : Composition des bétons à base de tufs avec superplastifiant, [kg/m³]

	Béton	Ciment	Eau	Sable	Tuf	Gravillon 3/15	Gravillon 15/25	Adjuvant
Tuf de Htattba	AS5	400	170	601.54	31.66	450	660	2.8
	AS15	400	180	538.20	95.0	450	660	2.8
	AS25	400	190	474.90	158.3	450	660	4
	AS35	400	210	411.58	221.62	450	660	4
Tuf de Boughezoul	BS5	400	175.3	601.54	31.66	450	660	2
	BS15	400	190.0	538.20	95.0	450	660	3
	BS25	400	223.3	474.90	158.3	450	660	4
	BS35	400	220.0	411.58	221.62	450	660	4.8

4.4.2. Composition des Bétons auto-plaçants

4.4.2.1. Construction d'un plan d'expériences

Il est important de connaître les types de plan d'expériences qui existe pour décider lequel est le plus approprié pour le phénomène étudié. Ils sont au nombre de quatre : on trouve les plans factoriels complets, les plans centrés composites, les plans fractionnaires et les plans mélanges. Les plans factoriels complets sont des plans d'expériences optimaux qui étudient toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs traités. Les plans de ce genre ayant des facteurs de deux niveaux +1 et -1, ont la particularité de répondre au critère d'Hadamard, stipulant que la multiplication de la matrice expérimentale par sa transposée est égale à la matrice unité ($X^t.X = N.I$). Une particularité qui fait que cette catégorie de plans d'expériences reste la plus optimale et celle qui nous garantit les meilleurs résultats. Les plans factoriels complets dont le niveau varie d'un facteur à un autre permettent d'étudier l'interaction d'un facteur avec soi-même. Ce qui se traduit par un passage d'un modèle linéaire à un modèle de degré supérieur. Les plans fractionnaires sont des plans issus des plans factoriels complets. Leur intérêt est de réduire le nombre d'essais. Ils sont recommandés dans le cas où le nombre de facteurs dépasse 5 variables [Goupy, 2006 ; Lee, 2006]. Dans notre cas, les plans d'expériences sont juste exploités pour la formulation des BAP et l'étude de l'influence des facteurs. L'établissement de modèles est envisagé pour la suite de la recherche en recourant à d'autre type de plan.

4.4.2.2. Choix des facteurs

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les composants les plus influents nécessaires à la confection d'un béton auto-plaçant à base de tuf calcaire. Les réponses seront les performances du BAP à l'état frais, soit l'étalement, le taux de remplissage, l'essai au tamis, et pour ce qui est de ses performances à l'état durci, la résistance à la compression à 28 jours. En réalité, il y a plusieurs facteurs qui sont susceptibles de modifier les performances rhéologiques et mécaniques du BAP. Leur énumération et étude sont primordiales pour la réussite du plan choisi et l'aboutissement à un résultat fiable. Les facteurs soumis à l'analyse dans cette recherche sont le dosage en ciment pour lequel l'influence sur les performances du BAP est irréfutable, le pourcentage de tuf introduit par substitution partielle au sable, élément phare dans ce travail et source de fines dans la formulation de ce béton. Entre autres, il est

considéré le dosage en superplastifiant dont l'utilisation est incontournable dans la confection de ce type de béton. L'aboutissement à ce choix n'a pas été hasardeux mais fait sur la base des résultats relatifs aux essais préliminaires et ceux issus de la littérature. Les valeurs usuelles de superplastifiant utilisées dans la fabrication des BAP sont comprises entre 10 et 20 Kg/m³ [Bouras, 2008]. Les autres facteurs sont les autres composants du béton (eau, gravillon et sable) et les conditions de déroulement des essais tel le matériel de mesure et de confection du matériau, l'opérateur, les conditions climatiques, et beaucoup d'autres facteurs dont certains sont contrôlables et d'autres non. Il a été supposé que les essais se déroulent dans les conditions avec le même manipulateur, pour réduire l'influence engendrée sur les réponses par les facteurs non contrôlables. Concernant les autres composants du béton, le rapport G/S est pris égale à un (01) et la quantité d'eau est ajustée au cours de l'essai afin d'obtenir l'ouvrabilité escomptée tout en veillant à garder le E/C < 0,7 pour éviter de mauvaises surprises sur les résistances à la compression.

Pour ce qui des niveaux de facteurs, dont les valeurs sont résumées dans le tableau suivant, ils sont obtenus après synthèses des données de la littérature et des essais entrepris au laboratoire [Khayat 1999 ; Kaoua, 2008]. Le domaine d'étude est élaboré tout en restant dans une plage usuelle.

Tableau 4.6 : Facteurs et leurs niveaux

Facteur	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Dosage en ciment : C (kg/m ³)	350	400
Pourcentage de tuf : T (%)	35	55
Dosage en superplastifiant : S (kg/m ³)	10	20

4.4.2.3. Choix du plan d'expériences

Avec un plan de trois facteurs à deux niveaux, il est obtenu un maximum de $2^3 = 8$ essais, et vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire, un plan factoriel complet s'avère le plus approprié pour ce projet. Les différentes combinaisons des huit expérimentations issues de l'application de ce plan d'expériences, sont résumées dans la matrice d'expériences présentée dans le tableau suivant:

Tableau 4.7. Matrice d'expériences

N° Essai	Ciment : C	Tuf : T	Superplastifiant : S
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

4.4.2.4. Compositions des bétons auto-plaçants

Les compositions des bétons auto-plaçants (BAP), résumé dans le tableau 4.8, sont obtenues par application du plan d'expériences choisi précédemment sans utilisation d'agent de viscosité qui s'est avéré inutile. Aussi, une seule fraction granulaire a été utilisée (3/15), conformément aux recommandations spécifiques pour ce type de béton. Quatre formulations de BAP sont rajoutées par rapport au plan décrit dans le §4.3.2.3 (BAP9 à BAP12), en prenant une valeur intermédiaire pour le tuf, soit 45 % d'ajout (cela correspond à « 0 » en valeurs réduites). Ceci permet d'affiner l'étude de l'influence du tuf sur les performances du BAP et aussi la vérification des modèles obtenus par des points supplémentaires.

Tableau 4.8 : Composition des BAP à base de tufs calcaires de Htattba, [kg/m³]

Béton	Ciment	Superplastifiant	Tuf	Eau	Sable	Gravillon 3/15
BAP1	350	10	315	260	585	800
BAP2	400	10	315	240	585	800
BAP3	350	10	495	224	405	800
BAP4	400	10	495	228	405	800
BAP5	350	20	315	235	585	800
BAP6	400	20	315	200	585	800
BAP7	350	20	495	224	405	800
BAP8	400	20	495	240	405	800
BAP9	350	10	405	240	495	800
BAP10	350	20	405	200	495	800
BAP11	400	10	405	250	495	800
BAP12	400	20	405	211	495	800

4.5. Préparation d'échantillons, corps d'épreuves et essais

Après le mélange des différents composants dans un malaxeur vertical pendant 15 mn, la mise en place du béton a été effectuée au moyen d'une table vibrante. Par la suite, les éprouvettes, au nombre de trois pour chaque essai, sont protégées avec un film polyane, puis stockées dans une salle à température ambiante (20 °C) et à humidité relative égale à 55%, en attendant de les démouler 24 heures après.

Les essais réalisés ont consisté en la caractérisation mécanique et physico-chimique. Cette caractérisation va englober essentiellement l'évaluation l'affaissement, pour ce qui se rattache à l'état frais du béton. La caractérisation à l'état durci concerne l'estimation de la résistance à la compression sur des cubes de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ selon la norme (EN 12390 – 3, 2001), ainsi que la résistance à la traction par flexion sur des prismes de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ (EN 12390 – 5, 2001) à 28 jours. Entre autres, la durabilité des mélanges a été appréhendée par des essais d'absorption totale et absorption par capillarité (cube de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) et des essais de perméabilité, en utilisant des cubes de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$. En complément à cette investigation expérimentale, il a été envisagé d'étudier la résistance des bétons formulés dans différents milieux agressifs. Des éprouvettes prismatiques de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ sont totalement immergées pendant 90 jours dans des milieux acides (sulfurique, chlorhydrique) et sulfatés (sulfate de sodium et le sulfate de magnésium), dosés à 5 %.

Les résultats des essais de durabilité, se traduisant par des augmentations de masse, sont convertis sous forme de coefficients plus commodes à l'interprétation. A cet effet, l'essai d'absorption totale, inspirés des recommandations de la [RILEM, 1977] et de la norme [ASTM C 642, 1997], se traduit par un coefficient d'absorption totale, exprimé en pourcentage et pris égal au rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon de béton entraînée par l'immersion totale dans l'eau pendant 24 heures, à sa masse sèche initiale. L'essai de l'absorption d'eau par capillarité du béton est celui appliqué aux pierres calcaires, selon la norme [NF B 10-502, 1989] où l'éprouvette est mise en contact avec l'eau sur une faible épaisseur de 5 mm dans une enceinte hermétique pendant 24 heures, aussi. L'absorption capillaire rapportée à l'unité de surface, est caractérisée par un coefficient de capillarité C_i , [Neville, 2000], mesurée en $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, définie par l'expression suivante :

$$C_i = 100 \cdot \frac{M}{S\sqrt{t}} \quad [\text{g/cm}^2.\text{s}]$$

où M : masse totale d'eau absorbée depuis le début de l'immersion, en grammes; S : section en centimètres carrés de la face inférieure de l'éprouvette; t : temps total, en secondes, écoulé depuis le début de la remontée capillaire.

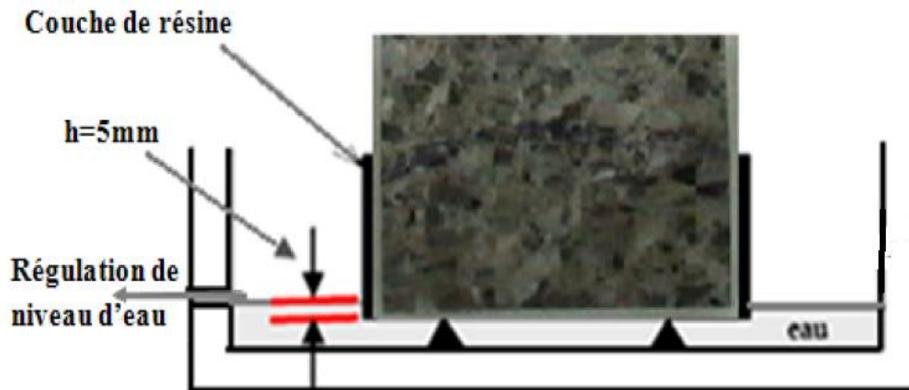


Figure 4.3 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité

La perméabilité caractérise l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide soumis à un gradient de pression. L'essai a été réalisé selon la norme [EN 12390 – 8, 2001] où les éprouvettes sont placées dans le perméabilimètre, montré dans la figure 4.4 et subissent une pression de 6 bars dans leur partie inférieure pendant 72 heures. La relation en dessous est appliquée pour convertir la profondeur de pénétration en coefficient de perméabilité, K_{eau} , [Neville, 2000].

$$K_{eau} = 10^7 \cdot \frac{x^2 \cdot v}{2 \cdot h \cdot t} \quad [\text{m}^2]$$

Avec x : profondeur de pénétration maximale de l'eau dans le béton en mètres ; t : durée d'application de la pression hydraulique en secondes ; h : charge hydraulique en mètres ; v : pourcentage du volume de béton occupé par les pores ; K_{eau} : coefficient de perméabilité à l'eau en mètre carré.

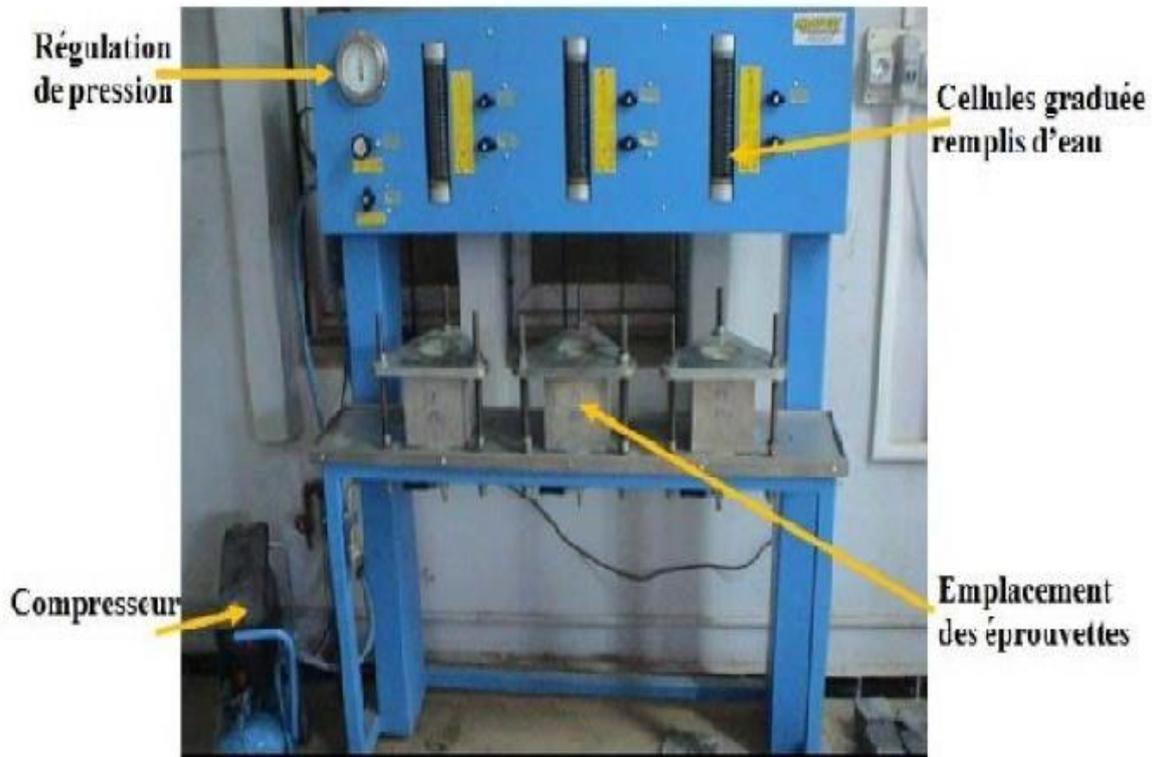


Figure 4.4 : Dispositif expérimental d'essai de perméabilité à l'eau

Pour les essais dans les environnements agressifs, des éprouvettes de béton de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ sont immergées dans des bacs en plastique, contenant différentes solutions agressives. La résistance chimique relative a été déterminée après trois mois d'immersion à la température ambiante. Les parties attaquées des éprouvettes de béton ont été lavées avec l'eau du robinet, ensuite la résistance chimique a été évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette comme suit :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Où M_1 : la masse en gramme (g) des éprouvettes avant l'immersion ; M_2 : la masse en gramme (g) des éprouvettes après une immersion de trois mois dans la solution agressive.

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

5.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés des différents mélanges réalisés : bétons courants avec ou sans superplastifiant et des bétons autoplacants. L'étude des propriétés de ces mélanges comporte trois parties. La première s'intéresse aux propriétés à l'état frais avec les mesures de l'affaissement, de la masse volumique et de l'air piégé, pour ce qui concerne les bétons courants. En revanche, l'étalement, la stabilité au tamis et la capacité de remplissage sont estimés pour les BAP. La deuxième partie concerne les propriétés mécaniques avec les mesures des résistances de compression et de traction effectuées à 7 et à 28 jours. La troisième partie traite la durabilité des bétons ordinaires, avec ou sans superplastifiants, dans des solutions agressives (acides et sulfatés). Les mesures faites sur les bétons ordinaires sont comparées aux résultats obtenus avec le béton de référence afin d'évaluer l'influence et la faisabilité d'ajout de tuf calcaire dans le béton. Au final, le tuf calcaire de Htattba renfermant le taux de fines le plus élevé sera valorisé dans la confection de BAP. Les performances rhéologiques et mécaniques seront scrutées et analysées pour conclure sur la possibilité d'ajout de ce matériau dans de ce type de béton. Pour ce faire, ces résultats seront confrontés aux spécifications stipulées par AFCG concernant les BAP.

5.2. Bétons usuels à base de tufs calcaires

5.2.1. Maniabilité (béton à teneur en eau constante)

L'ouvrabilité a été étudiée dans le cas des bétons ordinaires formulés sans adjuvant. Le maintien de la quantité d'eau constante égale à celle du béton de référence, pour tous les bétons à base de tufs calcaires a conduit à une perte de maniabilité, figure 5.1 et figure 5.2. En effet, l'affaissement qui était de 9 cm pour le béton de référence, a chuté jusqu'à 3 cm pour le béton A35 et B35. La perte de maniabilité est plus accentuée dans le cas de tuf de Htattba qui contient le pourcentage de fines le plus élevé. Donc, l'augmentation du pourcentage d'ajout de tuf agit négativement sur la rhéologie du béton. Ceci est dû à la présence importante des fines dans ce matériau et aussi à son caractère absorbant. D'ailleurs, le fait que le tuf de Htattba ayant le taux de fines le plus élevé, conduisant aussi aux chutes les plus importantes, confirme l'influence directe de cette fraction sur l'ouvrabilité.



Figure 5.1 : Mesure de l'affaissement (cône d'Abrams)

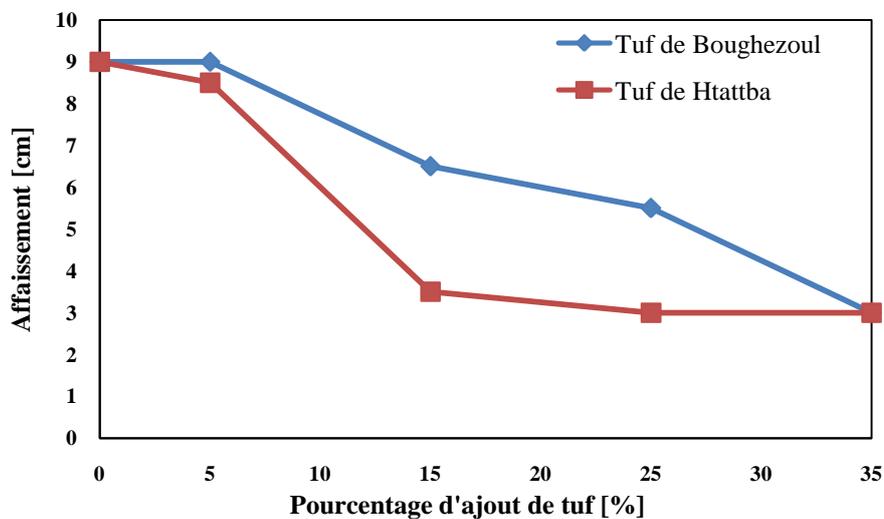


Figure 5.2 : Affaissement des bétons avec et sans tufs calcaires

Vu d'un autre angle, l'ajout progressif du tuf conduit à l'augmentation des fines dans les compositions ce qui implique une augmentation aussi de la surface spécifique des particules solides de telle sorte que la même quantité d'eau est insuffisante pour mouiller toutes les particules et celle qui servira à fluidifier le mélange sera insuffisante, [Neville, 2000].

5.2.2. Air occlus

L'ajout de tufs calcaires dans le béton agit positivement sur le pourcentage d'air occlus. Ce pourcentage diminue avec l'augmentation du pourcentage de tuf ajouté, figure 5.3. En contenant beaucoup de fines, les particules de tufs calcaires viennent se placer entre les grains composants le béton, comblant ainsi les vides et constituant une continuité de la granularité. De cette manière, la matrice des bétons avec tufs calcaires est plus compacte et contient moins

de vide. Le béton à base de tuf de Htattba présente les plus faibles pourcentages d'air occlus. Ceci est obtenu grâce à sa teneur en fines élevée.

A mentionner, que l'air occlus favorise la maniabilité en offrant un espace aux différents constituants pour se mouvoir. Sa réduction avec l'ajout de tuf est une raison supplémentaire qui, certes améliore la compacité mais pénalise la maniabilité, [Neville, 2000]. Cette présence agit doublement sur l'ouvrabilité en absorbant un supplément d'eau d'un côté et réduisant l'air occlus de l'autre. Ce phénomène est similaire à celui observé avec l'utilisation des entraîneurs d'air, dont l'objectif est de créer un réseau de bulles d'air uniformément répartie ayant pour objectif l'amélioration de la tenue du béton vis-à-vis du gel-dégel, mais qui améliorent en même temps la maniabilité.

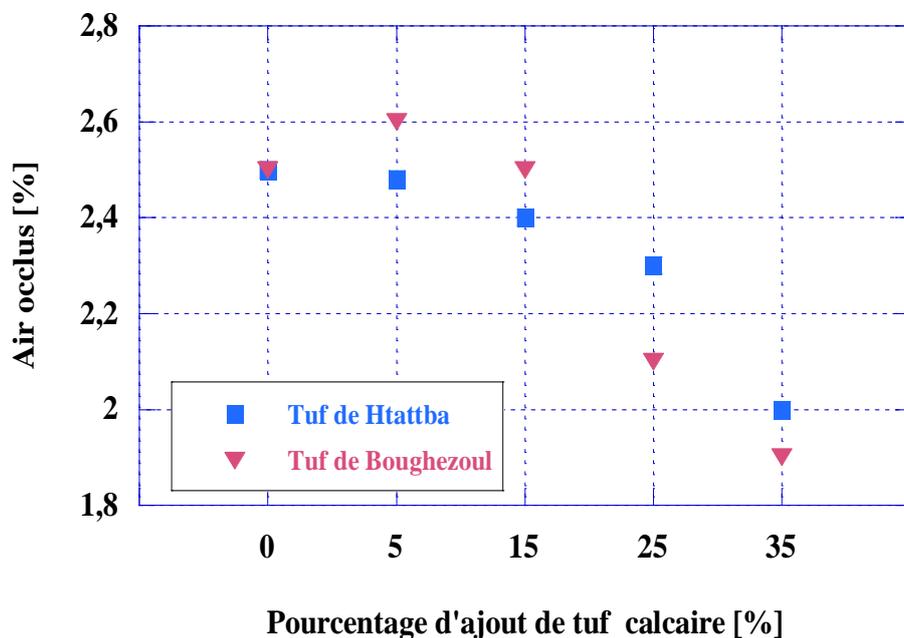


Figure 5.3 : Air occlus des bétons avec et sans tufs calcaires

5.2.3. Masse volumique

La masse volumique des bétons avec tufs calcaires chute dans la globalité, par rapport à celle du béton de référence, figure 5.4. Seuls les bétons à 5% d'ajout de tufs (A5 et B5) ont des masses volumiques légèrement supérieures ou égales à celle du témoin. Cette régression est la conséquence de la légèreté du tuf car il est distingué par des masses volumiques relativement faibles. Comme mentionné lors de la phase précédente, il est caractérisé par des densités variant dans une plage allant de 1.8 à 2 t/m³, tout en étant inférieures à 2 t/m³ dans la majeure partie des cas [Alloul, 1981 ; Ben Dhia, 1998].

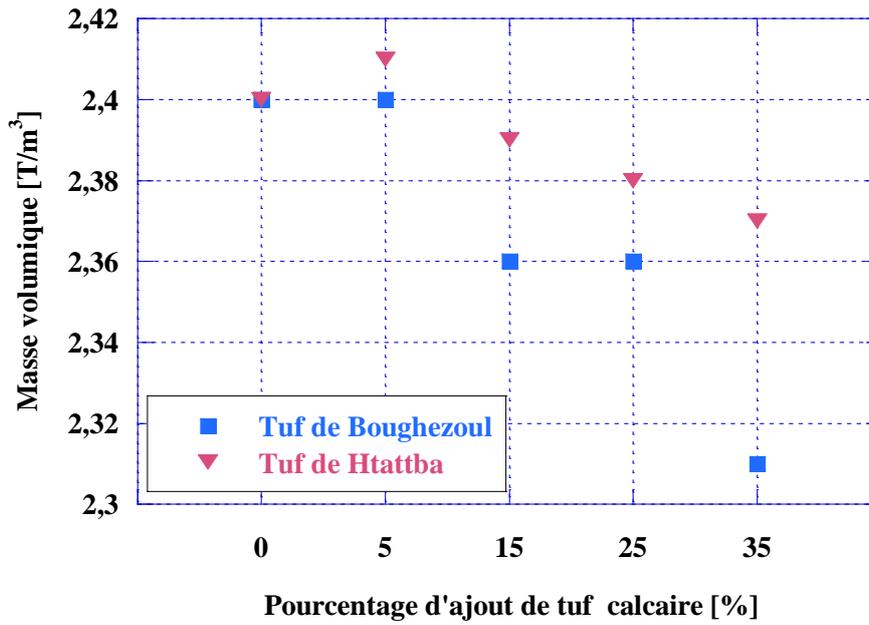


Figure 5.4 : Influence de l'ajout de tufs calcaires sur la masse volumique des bétons

5.2.4. Résistance à la compression

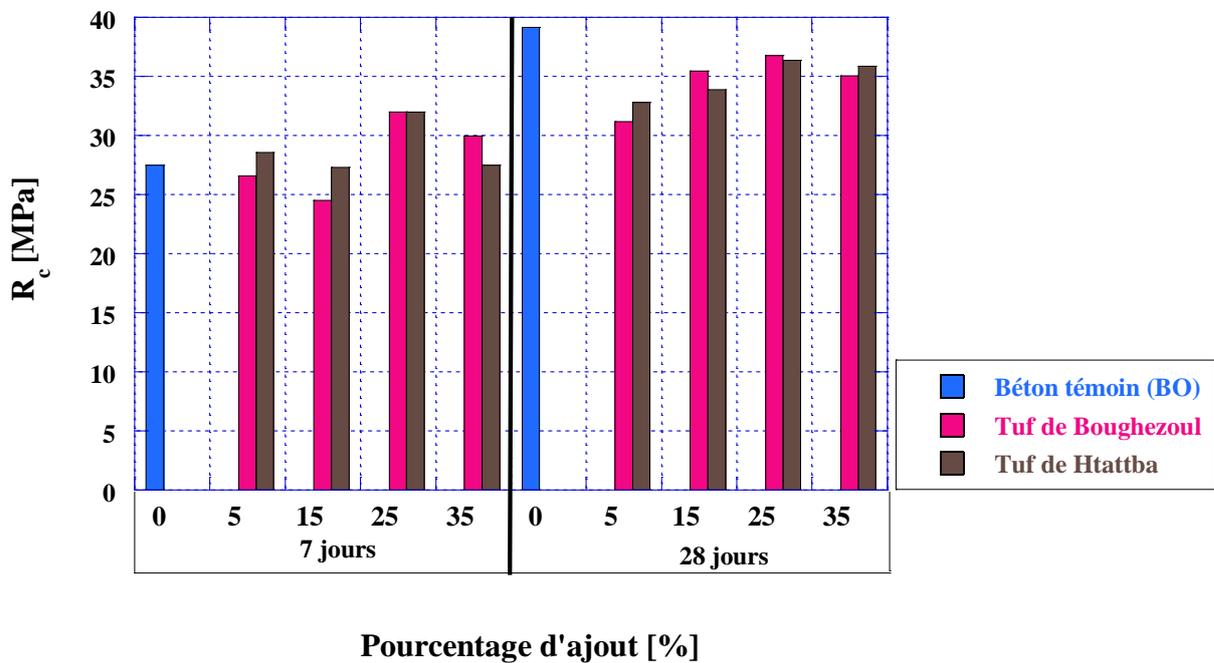


Figure 5.5 : Résistances à la compression des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant

Dans cette partie, les résistances à la compression des bétons sans superplastifiant sont étudiées en premier, suivi par celles obtenues avec les bétons adjuvantés. Les résistances obtenues sur les bétons à bases de tufs calcaires sans adjuvant sont inférieures à celle du béton de référence, figure 5.5. L'évolution de ces résistances en fonction du pourcentage de tuf met en exergue la présence d'un optimum à 25 % d'ajout. Cet optimum apparaît pour les deux tufs, de Htattba et de Boughezoul à 7 jours et à 28 jours. Certes, les valeurs de résistances obtenues en ce point sont inférieures à la résistance à la compression du témoin mais du moins, il est important de préciser qu'une R_c égale à 36 MPa est atteinte pour le béton B25. Cette résistance est importante et ne peut être ignorée. Elle peut être à l'origine d'une alternative économique fort intéressante pour les chantiers algériens qui sont en plein essor. Le seul problème pour ces bétons réside dans la chute de maniabilité soulevée précédemment. Il est difficile de mettre en place un béton ferme d'un affaissement de 3 cm, même si sa résistance est acceptable. D'ailleurs, cette contrainte était la raison pour laquelle on a eu recours à l'utilisation du superplastifiant.

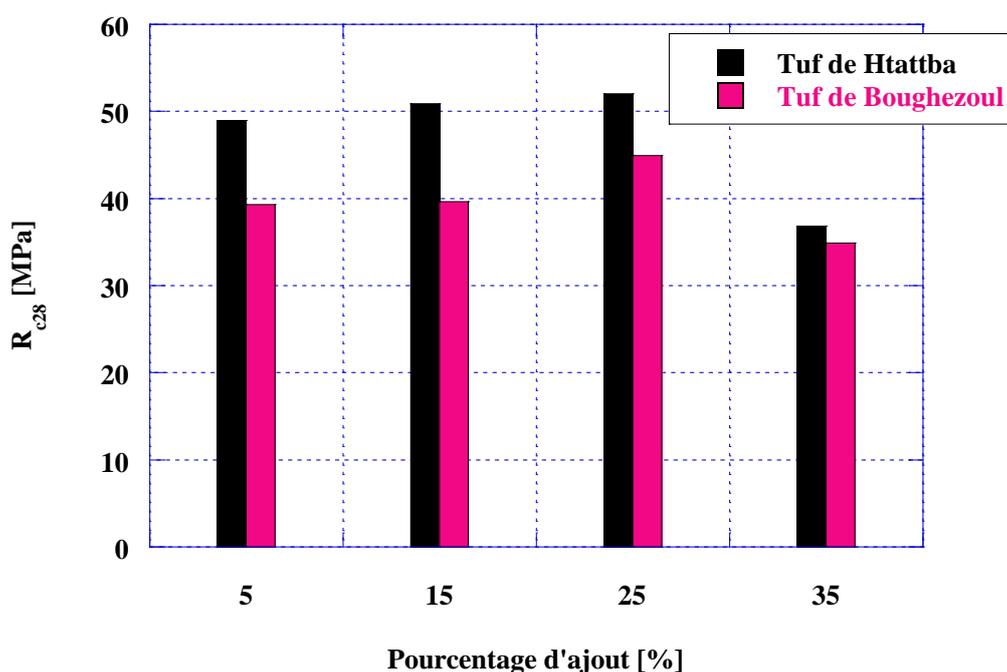


Figure 5.6 : Résistance à la compression des bétons avec tufs calcaires adjuvantés

Avec les bétons adjuvantés, il est constaté un gain de résistance et la présence aussi de l'optimum à 25% comme pour les bétons sans adjuvant, figure 5.6. Les bétons reformulés avec du superplastifiant, présentent des maniabilités similaires à celle du béton de référence,

en l'occurrence des affaissements de 10 cm sont obtenus. En revanche, les résistances à la compression atteignent une valeur dépassant les 50 MPa avec le tuf de Htattba. L'utilisation du superplastifiant s'adapte parfaitement avec l'utilisation des tufs. Leur utilisation a conduit, en plus de l'amélioration de la maniabilité, à l'augmentation de la densification de la matrice et donc de la compacité. Grâce à leur pouvoir défloculant, l'arrangement granulaire se fait de telle manière que les particules de tufs se placent aisément dans les vides conduisant à l'augmentation des performances mécaniques. Ces résistances sont plus importantes pour les bétons à base du tuf de Htattba en atteignant une valeur maximale à 25 % d'ajout de l'ordre de 52 MPa. Elle représente un gain de plus de 33 % en comparaison avec le béton témoin (BO). En revanche, le tuf de Boughezoul a permis la confection de béton ayant une résistance maximale, toujours à 25 % d'ajout, égale à 44 MPa. Dans ce cas, le gain est inférieur et il est de l'ordre de 13 %. Cette différence entre les performances obtenues avec les deux tufs calcaires, peut être attribuée à la teneur de fines plus élevée du tuf de Htattba qui améliore, sans doute, la compacité du mélange en comblant les vides intergranulaires.

Cette tendance de l'évolution de la résistance à la compression est similaire à l'utilisation des fines calcaires et le sable de concassage dans le béton. Plusieurs recherches ont été publiées sur ces thèmes. Des pics apparaissent différents d'un matériau à un autre. Comme exemple, le taux de fines tolérables des sables de concassage est de l'ordre de 15% [Ramirez, 1987]. Par ailleurs, les fillers permettent l'obtention des résistances mécaniques les plus élevées pour des taux de 10 à 15% [Stewart, 2007]. La comparaison de ces résultats à ceux obtenus dans cette étude n'est pas systématique, il faut déduire d'abord le taux de fines à 25% d'ajout de tuf. Ce taux de fines optimal correspond à 9% pour le tuf de Htattba et à 7% pour le tuf de Boughezoul. Ce taux peut être qualifié de faible en comparaison avec les taux des autres matériaux de substitution. Seulement, les avantages que présente l'économie de 25% de sable grossier sont indéniables dans l'état actuel de la disponibilité des matériaux de construction en Algérie.

5.2.5. Résistance à la traction par flexion

Les résistances à la traction par flexion suivent la même tendance que celles relatives à l'essai de compression, figure 5.7. En effet, dans les bétons à base de tufs calcaires on retrouve les résistances maximales à 25% d'ajout pour les bétons sans et avec adjuvant. Concernant les valeurs obtenues, elles sont inférieures à celle du béton témoin dans le cas des bétons sans

adjuvant. La perte minimale de résistance est égale à 3% en comparant le béton à 25% d'ajout (A25) avec le béton de référence (BO).

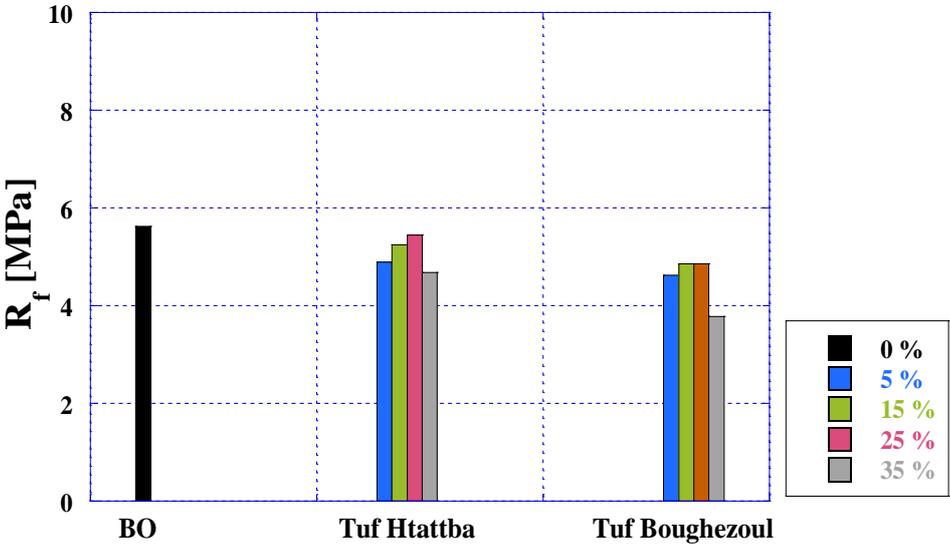


Figure 5.7 : Résistance à la traction par flexion des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant

Dans le cas des bétons adjuvantés, il y a augmentation de ces résistances à la traction par flexion, figure 5.8. Le gain maximal obtenu est de l'ordre de 60% à 25% d'ajout. De la même manière que pour la compression, l'accroissement est obtenu grâce à la défloculation des fines et l'amélioration de la compacité.

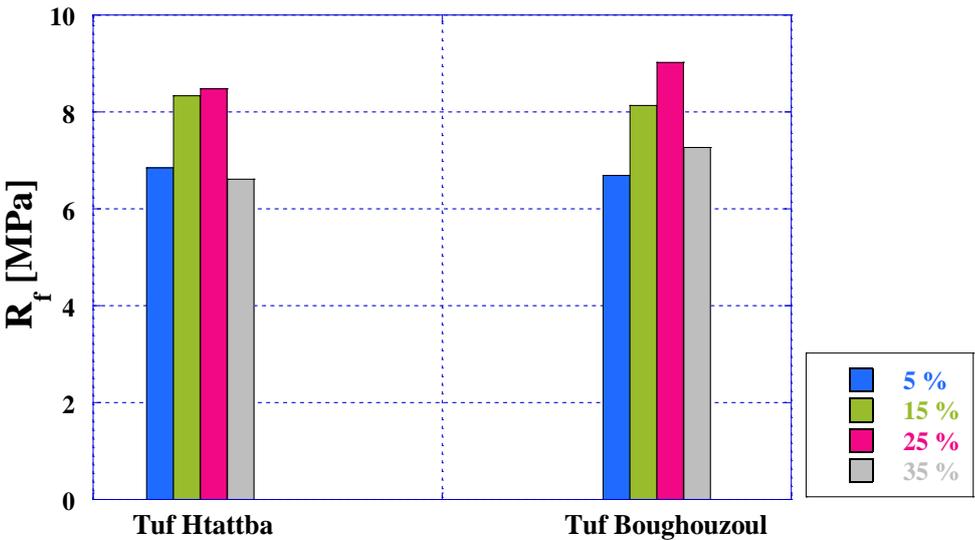


Figure 5.8 : Résistance à la traction par flexion des bétons à base de tufs calcaires avec adjuvant

5.2.6. Propriétés physiques

5.2.6.1. Absorption totale

L'absorption totale des bétons à base de tufs calcaires enregistre une valeur maximale à 35% d'ajout de tuf de Htattba, figure 5.9. Ceci est dû à la nature du tuf qui a tendance à absorber l'eau plus que les autres matériaux, notamment le sable. Dans la globalité, les pourcentages d'eau absorbés par les bétons avoisinent ceux du béton de référence, et ils sont inférieurs pour les dosages de 5 et 15 % d'ajout de tufs et à 25% d'ajout dans le cas du tuf de Htattba seulement. L'augmentation de l'absorption s'est faite sentir à partir de 25 % pour le tuf de Boughezoul et à 35 % pour le tuf de Htattba. En revanche, dans le cas des bétons adjuvés, cette absorption diminue en prenant des valeurs en dessous de celle du témoin, figure 5.10. Ceci est éventuellement attribué à l'amélioration de la compacité grâce à l'utilisation de superplastifiant qui aide la matrice cimentaire du béton à faire barrage à la pénétration de l'eau dans les pores.

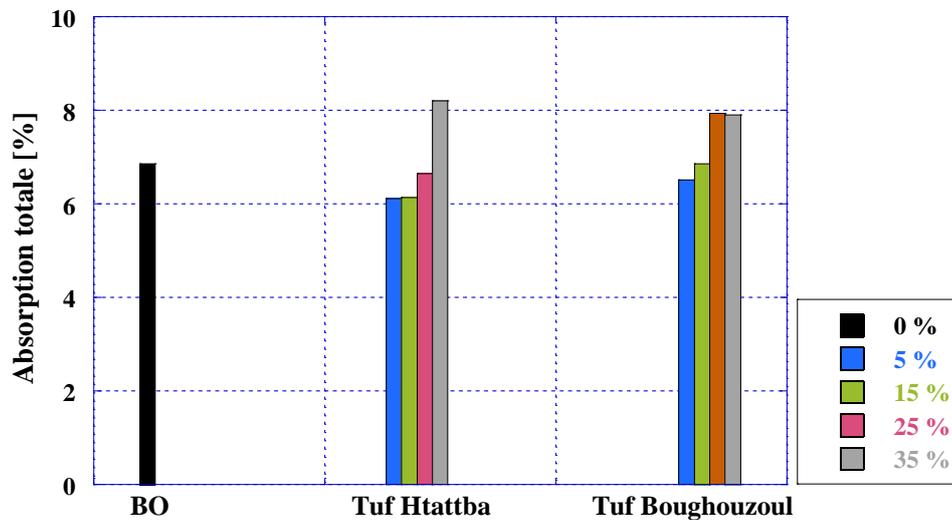


Figure 5.9 : Absorption totale des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant

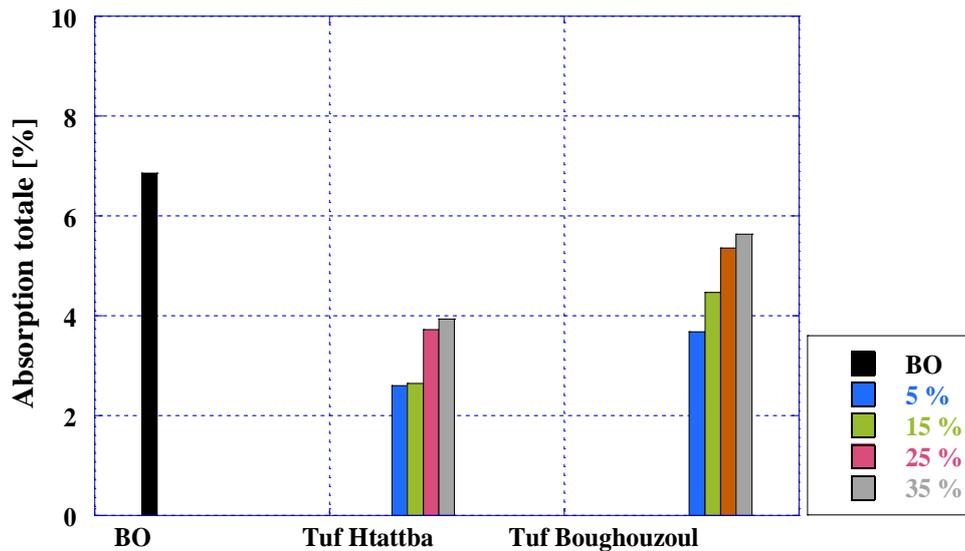


Figure 5.10 : Absorption totale du béton témoin et des bétons adjuvés à base de tufs calcaires

5.2.6.2. Absorption par capillarité

L'absorption capillaire rapportée à l'unité de surface, est caractérisée par un coefficient de capillarité C_i , [Neville, 2000].

Les absorptions capillaires des bétons, avec et sans adjuvant, à base de tufs calcaires sont plus importantes que celle du béton témoin, figure 5.11 et 5.12. Néanmoins, il est opportun de préciser que cette absorption est réduite pour les bétons avec adjuvant. Ceci est la conséquence du réaménagement granulaire obtenu par l'emploi du superplastifiant. Le serrage des grains, obtenu suite à l'utilisation de ce dernier, fait obstacle à la pénétration de l'eau.

La comparaison entre absorption totale et celle par capillarité fait apparaître une différence de comportement dans le cas des bétons adjuvés. Les absorptions totales de ces bétons adjuvés sont plus réduites par rapport au témoin. Par contre, les absorptions par capillarité, malgré leur réduction avec l'utilisation du fluidifiant, restent supérieures à celle du témoin. Ceci est probablement attribué, en plus à la capacité absorbante du tuf, aux dimensions plus petites des pores pour les bétons adjuvés. Les petits pores augmentent la capacité de succion du matériau, dans un laps de temps plus petit. Autrement dit, le matériau est capable d'une absorption plus rapide si ses pores sont plus petits.

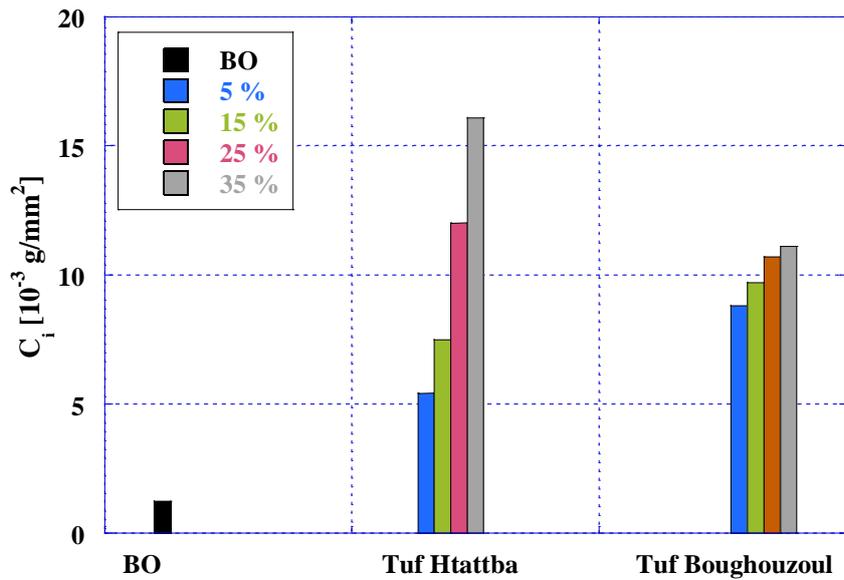


Figure 5.11 : Absorption capillaire des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant

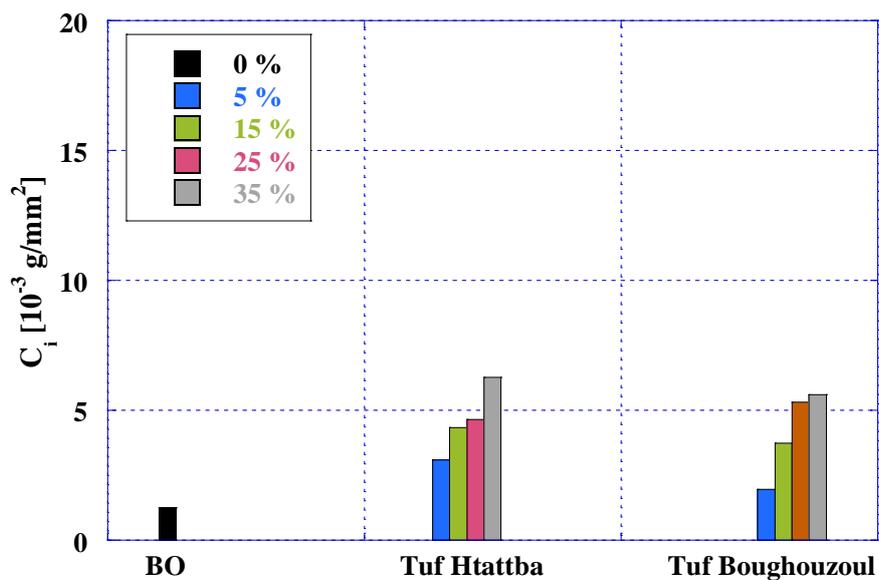


Figure 5.12 : Absorption capillaire du béton témoin et des bétons adjuvantés à base de tuf calcaires

5.2.6.3. Perméabilité des bétons

Les résultats obtenus mettent en relief que l'ajout de tufs calcaires accroît la perméabilité des bétons avec et sans adjuvant, figure 5.13 et 5.14. Cette perméabilité est plus importante dans

le cas du tuf de Htattba doté du coefficient d'absorption le plus élevé (égale à 11 %), si on compare les deux tufs. Entre autres, elle est inférieure pour les bétons avec superplastifiant, tout en restant supérieure à celle du béton témoin.

En effet, la perméabilité des bétons sans adjuvant prend des valeurs qui atteignent 15 fois celle du béton de référence. Dans les seconds types de bétons, les valeurs obtenues sont plafonnées à 08 fois celle de BO. Une similitude est observée entre cette évolution et celle de l'absorption capillaire. Elle s'explique donc de la même manière et augmente à cause de la capacité d'absorption élevée du tuf.

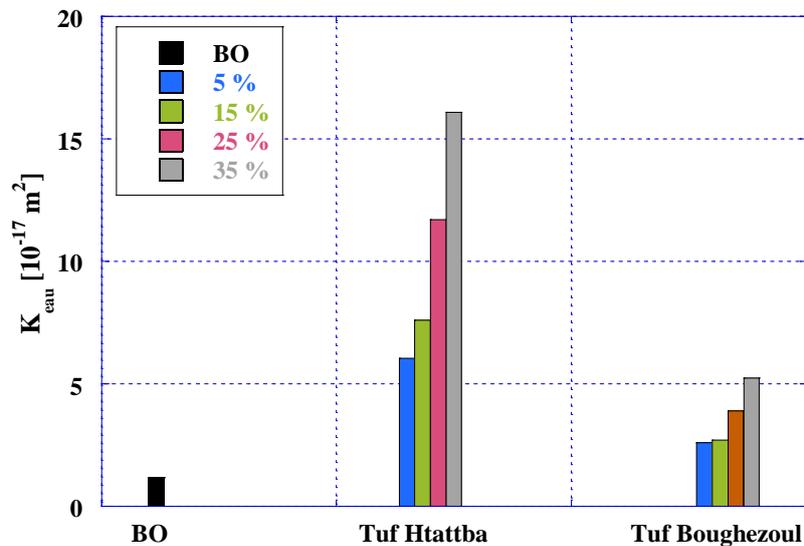


Figure 5.13 : Perméabilité des bétons à base de tufs calcaires sans adjuvant

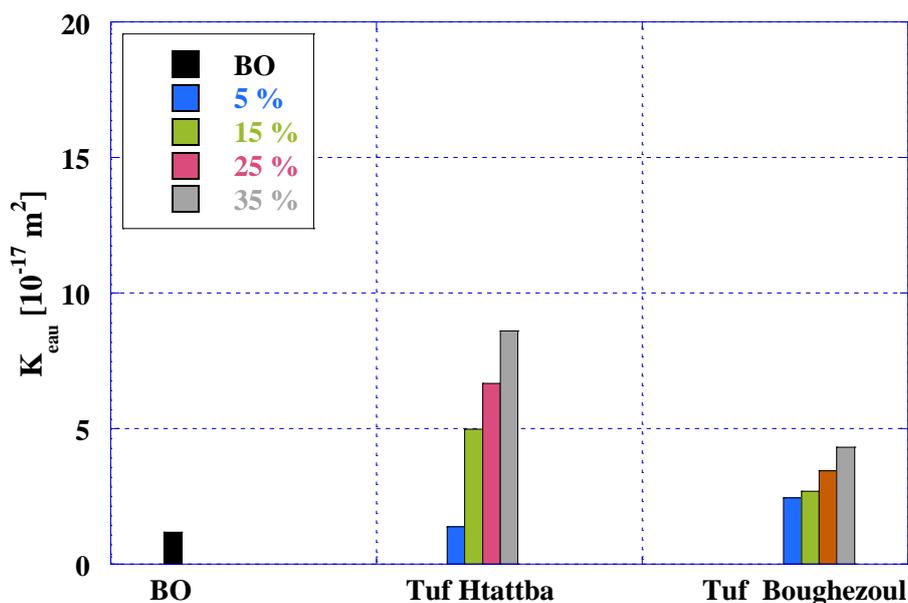


Figure 5.14 : Perméabilité des bétons à base de tufs calcaires avec adjuvant

5.2.7. Résistance en milieux agressifs

5.2.7.1. Résistance aux acides des bétons à base de tufs

Les images de la figure 5.15 montrent l'état de surface et l'aspect visuel des éprouvettes des bétons immergées pendant 90 jours dans des solutions à 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) et à 5% d'acide chlorhydrique (HCl). Les éprouvettes immergées dans la solution d'acide sulfurique présentent des dégradations plus importantes visibles à l'œil nu avec lessivage de la matrice et apparition frappante des gros granulats. Celles immergées dans l'acide chlorhydrique présentent les mêmes dégradations de déchaussement des granulats mais avec moins d'intensité et la matrice cimentaire a été lessivée sur des profondeurs moins importantes. Concernant la couleur des échantillons, elle s'est éclaircie pour celles immergées dans l'acide sulfurique et a gardé la couleur grise pour celles conservées dans la deuxième solution (HCl). En réalité, l'acide s'est attaqué à la pâte cimentaire conduisant à son érosion laissant apparaître les agrégats.

La dégradation des bétons immergés dans les deux solutions d'acides est due principalement à la décomposition des produits d'hydratation et de la formation de nouveaux composés. La réaction d'un acide avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment donne naissance à un sous-produit de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans son ensemble [Baron, 1982]. Ceci se traduit par une perte de masse des éprouvettes immergées. Il est constaté que cette perte de masse augmente avec l'augmentation du dosage de tufs calcaires, figures 5.16 et 5.17. Elle est plus importante avec l'acide sulfurique qui est plus nocif pour le béton. Elle oscille entre 2.07% et 2.9%, dans le cas de l'acide chlorhydrique. Concernant l'acide sulfurique, cette perte est comprise entre 3.34% et 8.3%, en prenant comme référence les résultats du béton témoin.



a/ 5% acide sulfurique



b/ 5% acide chlorhydrique

Figure 5.15 : Eprouvettes de béton immergées dans les solutions acides

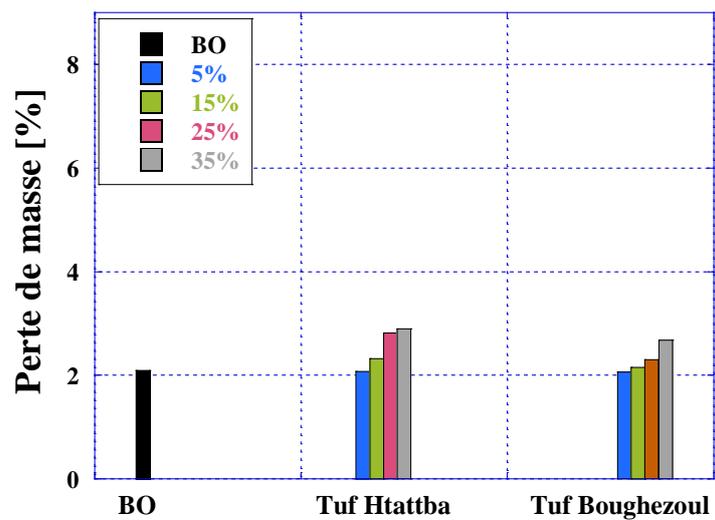
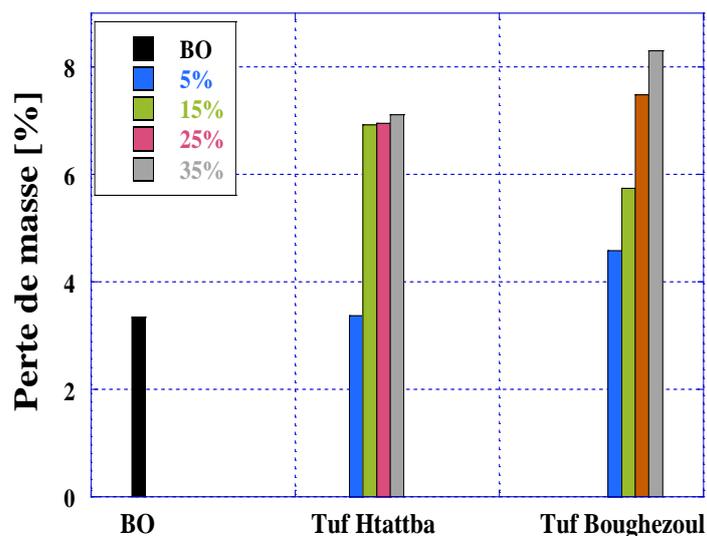


Figure 5.16 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans Une solution à 5% d'acide chlorhydrique



b/

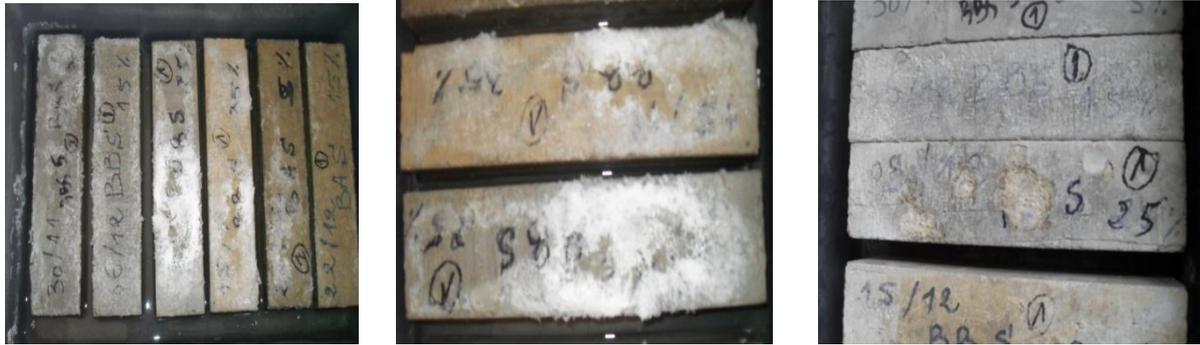
Figure 5.17 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% d'acide sulfurique

5.2.7.2. Résistance aux sulfates des bétons à base de tufs

Les sulfates sont présents naturellement dans les sols, surtout dans les régions qui contiennent du gypse tel que le sud et l'ouest de l'Algérie. Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration peuvent contenir des sulfates par le contact direct avec des sols sulfatés ou par la pollution des environnements industriels. L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre l'ion sulfate, les aluminates et la portlandite. Ces deux derniers constituent les composés les plus sensibles à l'attaque par les sulfates. Les produits qui résultent de ces réactions sont l'étringite et le gypse [Baron, 1982]. Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse, on peut rencontrer des concentrations élevées.

L'examen visuel des échantillons (figure 5.18) qui ont été conservés dans une solution de sulfate de sodium, montre qu'ils se recouvrent d'une substance blanche (gypse). Elle est plus intense dans ceux qui ont été conservés dans une solution de sulfate de magnésium accompagnée d'écaillage de la surface extérieure. Ces dégradations de la surface sont le

résultat de réactions chimiques conduisant à de nouveaux composés. Ceci crée une expansion qui induit une pression causant des éclatements.



a/ 5% sulfate de magnésium



b/ 5% sulfate de sodium

Figure 5.18 : Epreuves de béton immergées dans les solutions sulfatées

Les pertes de masse des éprouvettes dans ces solutions sulfatées, figures 5.19 et 5.20, sont moins prononcées que celles obtenues avec les solutions acides, plus nocives pour les bétons à base de tufs calcaires. L'influence de ces éléments agressifs sur ces bétons n'est pas claire. La perte varie de manière aléatoire, néanmoins, elle est plus importante dans le cas du sulfate de magnésium. Pour le sulfate de sodium, les échantillons à base de tufs calcaires présentent une meilleure tenue que le témoin. Il s'avère que la seule mesure de perte de masse durant une durée de 90 jours reste insuffisante pour cerner les phénomènes qui se produisent dans le cas du sulfate de magnésium. Des investigations plus poussées à l'échelle microscopique sont nécessaires pour comprendre les mécanismes de dégradation et de conclure sur l'influence de cet agent chimique.

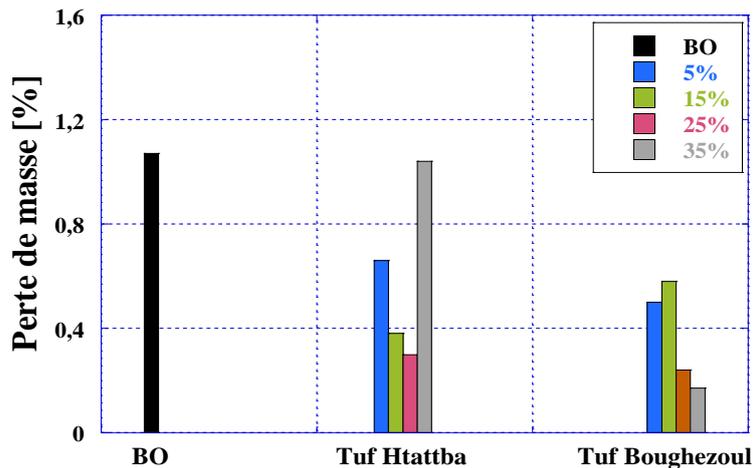


Figure 5.19 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% de sulfate de sodium

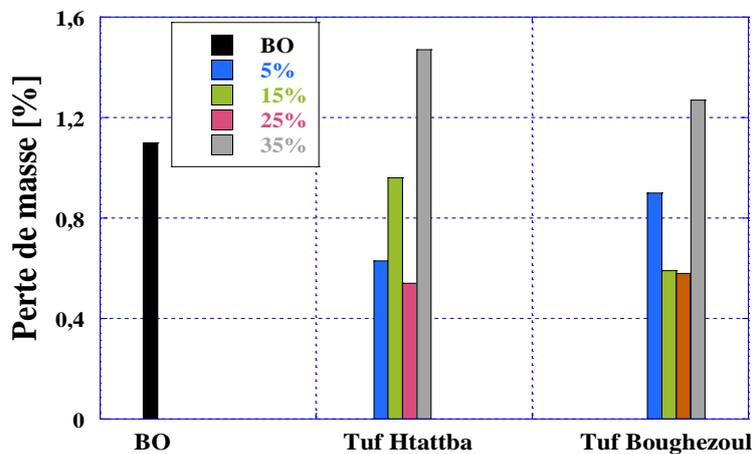


Figure 5.20 : Perte de masse des bétons avec tufs calcaires immergés dans une solution à 5% sulfate de magnésium

5.3. Béton auto-plaçant avec tuf calcaire

Dans la globalité, les BAP élaborés à base du tuf de Htattba, dont les résultats sont regroupés dans le tableau 5.1, présentent des performances rhéologiques nous permettant de prétendre avoir atteint l'objectif de formulation de BAP avec l'utilisation de ce matériau local qu'est le tuf calcaire, figure 5.21. Mieux encore, son utilisation s'adapte mieux pour ce type de béton grâce au taux de fines élevé qu'il renferme. La présence de cette fraction (fine) est plus prononcée dans ce type de béton qu'ailleurs.



Figure 5.21 :. Essais d'étalement (a) et de la boîte en L d'un BAP (b et c)

A rappeler que l'essai de stabilité au tamis consiste à verser dix (10) litres de béton dans un seau juste après le malaxage. Le seau est couvert pour protéger le béton de la dessiccation. Après 15 mn, une quantité de cinq (05) kg de béton est versé au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture à une hauteur de chute de 50 cm. Deux (02) minutes plus tard, le poids de la laitance passée au tamis sera calculé. Le pourcentage de cette laitance, par rapport au poids initial, ne doit pas dépasser les 15 % pour les BAP. Le taux de remplissage de la boîte en L, TR est déterminé par la formule (8) après mesure des hauteurs H_1 et H_2 (figure 5.21.c).

$$TR = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Tableau 5.1 : Récapitulatif des résultats obtenus sur les BAP

Béton	Étalement (mm)	Stabilité Tamis (%)	TR (%)	R _{c28} (MPa)
BAP1	520	5.54	0.35	31.7
BAP2	550	0.01	0.38	43.6
BAP3	600	7.42	0.84	31.3
BAP4	640	5.36	1.01	38.3
BAP5	645	4.97	1.03	32.0
BAP6	660	8.70	1.04	45.5
BAP7	670	12.70	1.04	31.3
BAP8	690	8.03	1.10	40.3
BAP9	600	8.85	0.75	31.5
BAP10	650	0.00	0.97	34.0
BAP11	630	6.50	0.90	40.0
BAP12	650	7.02	1.00	40.5
Recommandations AFCG	650-700	<15	>0.80	-

5.3.1. Etalement

Les étalements des BAP6, 7, 8, 10 et le BAP12 sont conformes au seuil préconisé par AFGC. Ils varient dans une plage allant de 650 à 690 mm. Sur les 12 bétons formulés, cinq ont la fluidité escompté d'un BAP, figure 5.22. Au regard de leurs compositions (tableau 4.8), on en déduit que le facteur en commun entre ces 5 bétons est le dosage en superplastifiant qui est à la valeur maximale, en l'occurrence 20 kg/m³. Sachant que c'est ce type d'adjuvant qui a donné naissance au béton autoplaçant, il n'y a rien de surprenant dans ce constat. Par ailleurs il est opportun de préciser que seuls les bétons BAP1 et BAP2 ont des étalements en dessous de 600 mm. Concernant le ciment et le tuf calcaire, les dosages sont variables allant des valeurs minimales jusqu'aux valeurs maximales. Néanmoins, le BAP 8, referment le dosage maximal en ciment et en tuf, soit 400 Kg/m³ de ciment et 55% de substitution partielle de tuf calcaire. Si le fait que le dosage maximal de superplastifiant conduisait aux étalements les plus élevés était évident, il n'en est rien pour le dosage en ciment et en tuf.

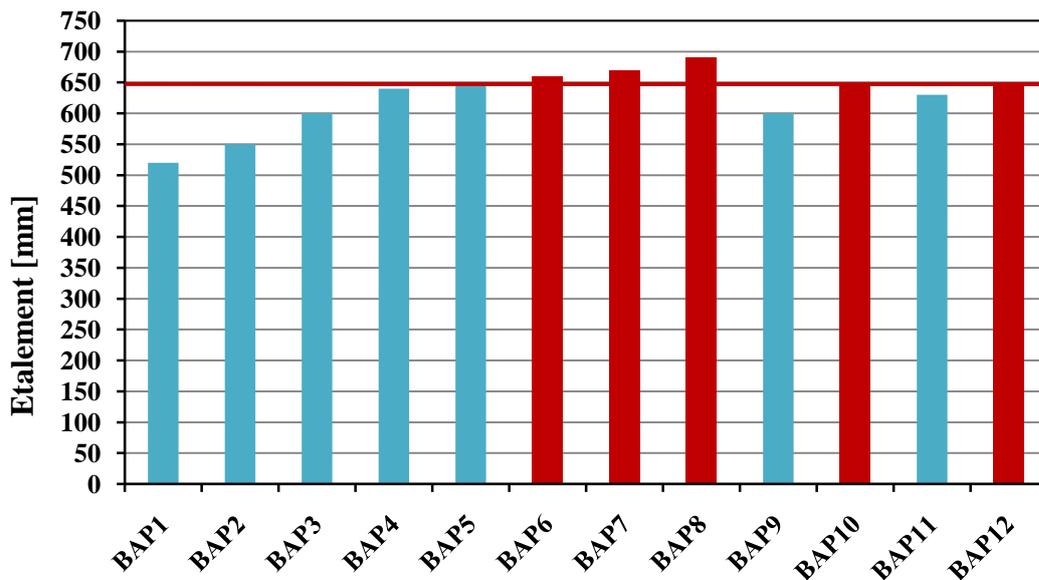


Figure 5.22 : Diamètres d'étalement des BAP à base de tuf calcaire de Htattba

Pour une meilleure compréhension de l'influence des composants sur la fluidité des BAP, il a été mis en relief l'effet des différents facteurs (ciment, tuf et superplastifiant) deux à deux, sur l'étalement des bétons, figure 5.23. L'examen des surfaces de réponses reportées sur cette figure met en exergue l'augmentation de l'étalement avec l'augmentation non seulement du dosage du superplastifiant mais même avec celui du ciment et du tuf. On expliquera cela par

le fait que les fines grains de ciment et le tuf, en présence d'un puissant fluidifiant doté d'une grande capacité de défloculation, jouent le rôle de microbille dans le mélange ayant un mouvement aisé et sans frottement favorisant ainsi la fluidité de l'ensemble.

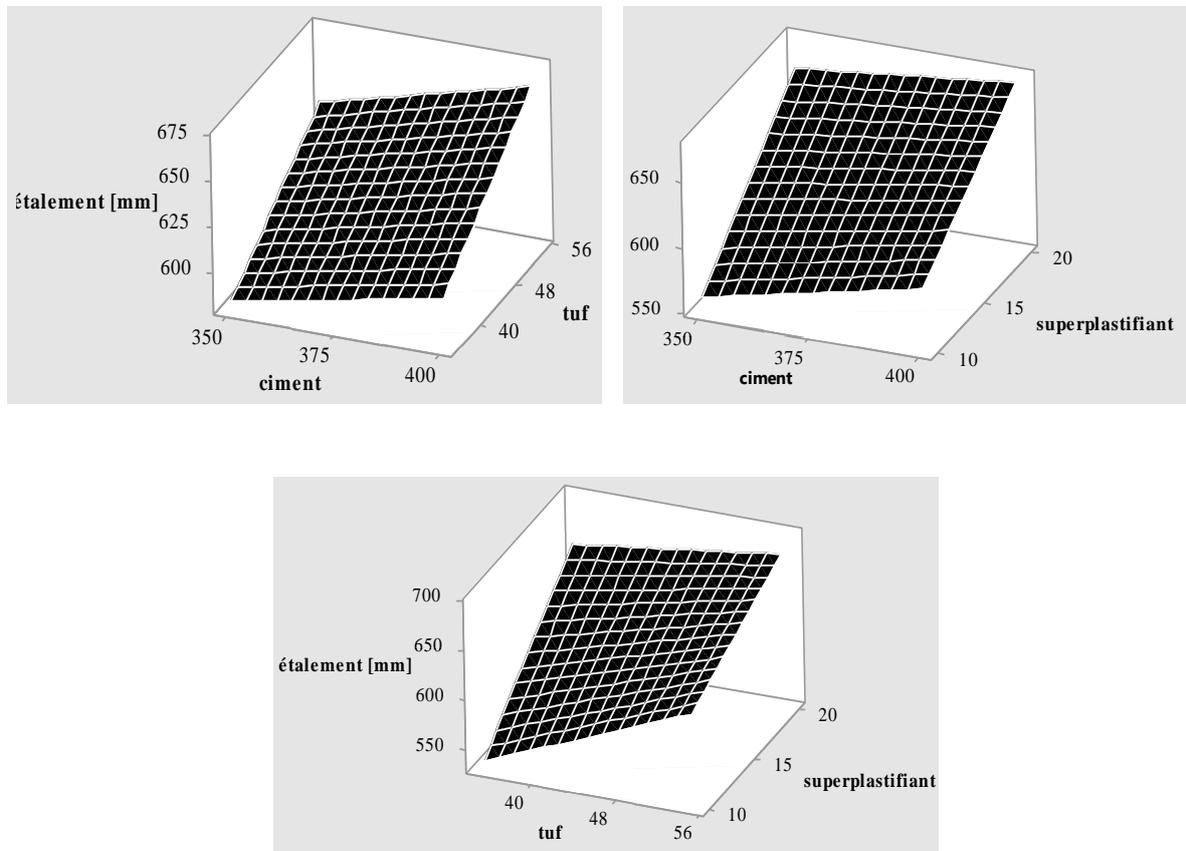


Figure 5.23 : Effet des différents facteurs sur l'étalement des BAP

5.3.2. Stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis vise à caractériser les bétons autoplaçants vis-à-vis de la ségrégation. Le pourcentage de passant par rapport à la masse initiale de l'échantillon donne une évaluation de la résistance à la ségrégation du béton. Les valeurs obtenues sur tous les BAP sont inférieures à 15% et donc conformes au critère de L'AFCG, figure 5.24.

L'examen des surfaces de réponses reportées sur la figure 5.25 montre que la stabilité au tamis des BAP à base de tuf de Htattba chute avec l'augmentation du dosage en ciment. En revanche, elle augmente avec l'augmentation du dosage en tuf et en superplastifiant. En résumé, le ciment influence positivement sur la résistance à la ségrégation des BAP contrairement au superplastifiant et au tuf. L'effet négatif du superplastifiant est compréhensible car il est connu pour son rôle de rendre les mélanges très fluides au détriment de leurs stabilités. Par contre, l'effet négatif du tuf reste inexpliqué sachant qu'il a joué le rôle

d'agent de viscosité grâce à son absorption élevée. Plus d'investigations sont à faire pour élucider ce paradoxe.

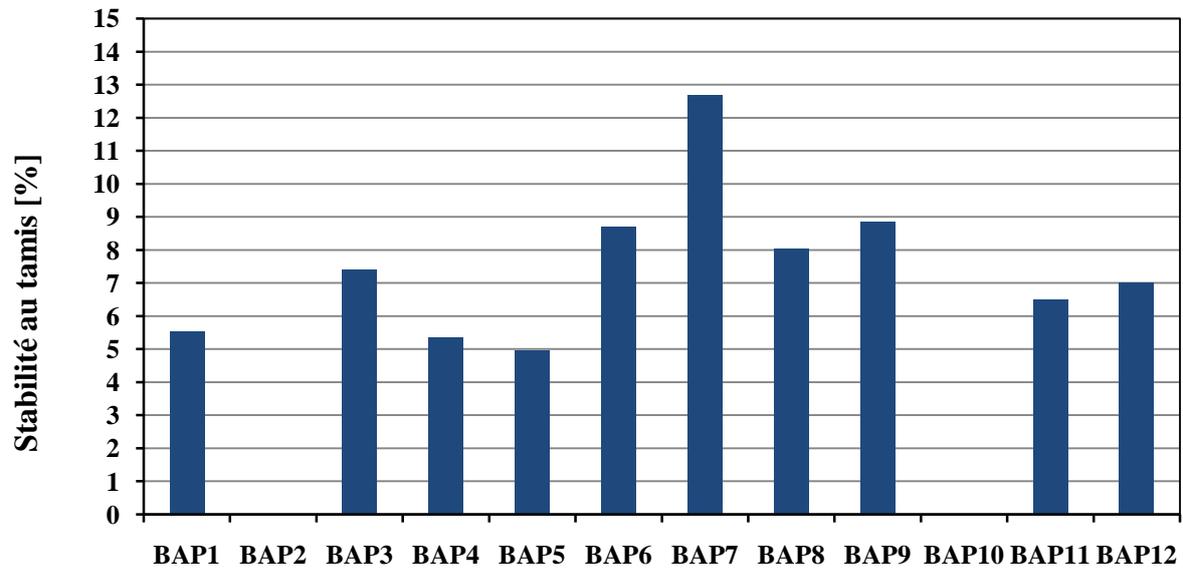


Figure 5.24 : Stabilité au tamis des BAP à base de tuf calcaire de Htattba

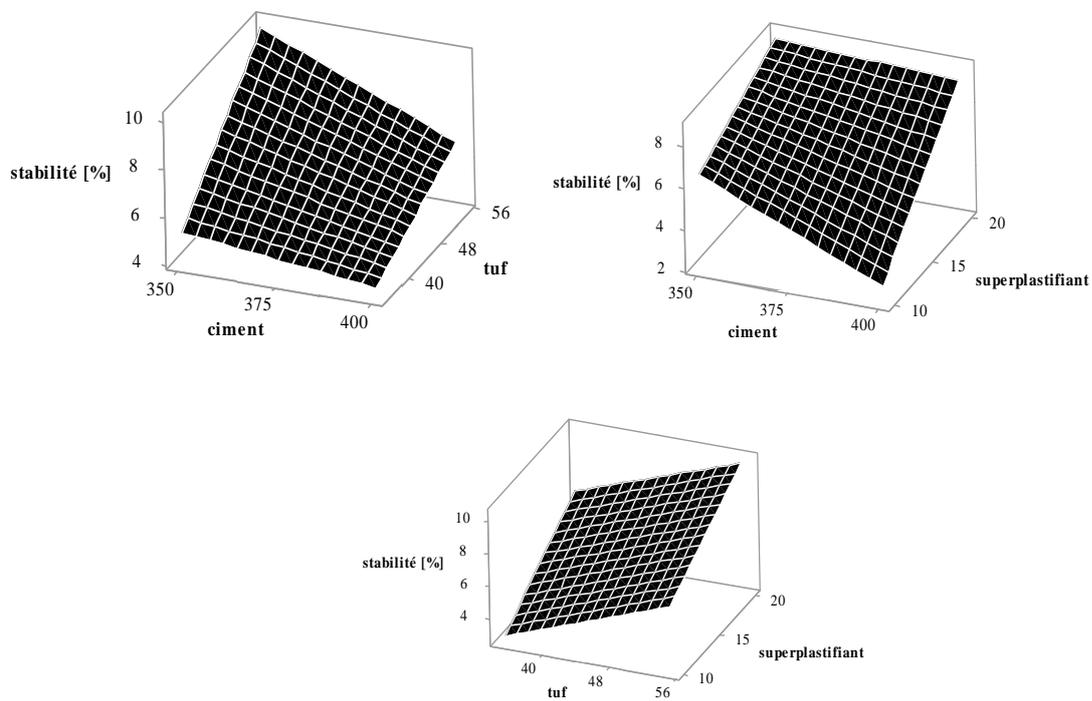


Figure 5.25 : Effet des différents facteurs sur la stabilité au tamis des BAP

5.3.3. Taux de remplissage à la boîte en L

Cet essai renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné fortement ferraillé. Plus le rapport du taux de remplissage, H_2/H_1 (TR) se rapproche de 100%, plus l'écoulement du béton à travers les barres de ferrailage dense, est meilleur. Concernant les BAP formulés dans cette investigation, leurs taux de remplissage sont conformes dans la globalité. Seul les BAP1, BAP2 et le BAP9 n'ont pas le taux exigé. Ces trois bétons sont confectionnés avec le dosage minimal de superplastifiant (10 kg/m^3).

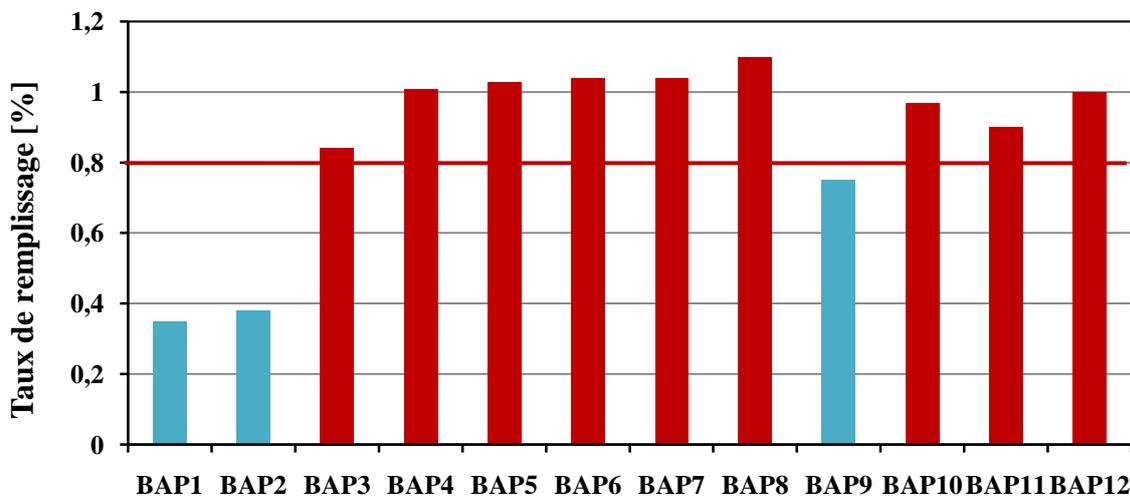


Figure 5.26 : Taux de remplissage à la boîte en L des BAP à base de tuf calcaire de Htattba

Cet effet bénéfique du superplastifiant qui agit positivement et améliore la capacité d'un BAP de s'écouler à travers un ferrailage dense sans blocage, est confirmé au regard des surfaces reportées sur la figure 5.27. Par ailleurs, le TR est peu ou presque pas influencé par la quantité de ciment, contrairement au tuf. Ce dernier agit similairement au superplastifiant, son augmentation conduit à l'augmentation de la capacité de remplissage. Malgré son contenu élevé en fines et sa forte absorption, sa présence favorise l'écoulement. Ce paradoxe a été déjà observé précédemment dans l'étude de l'étalement. On peut donc conclure que le tuf en présence d'un fort fluidifiant a un effet positif sur la rhéologie des bétons. Pour rappel, ce même contraste relatif à l'effet positif du ciment sur la variation de l'étalement a été observé, mais non confirmé dans le cas de TR. Seulement, il faut préciser que même si cet effet positif du dosage de ciment n'est nettement apparent dans les résultats de l'essai à la boîte en L, il faut tout de même souligner sa présence, aussi petit soit elle.

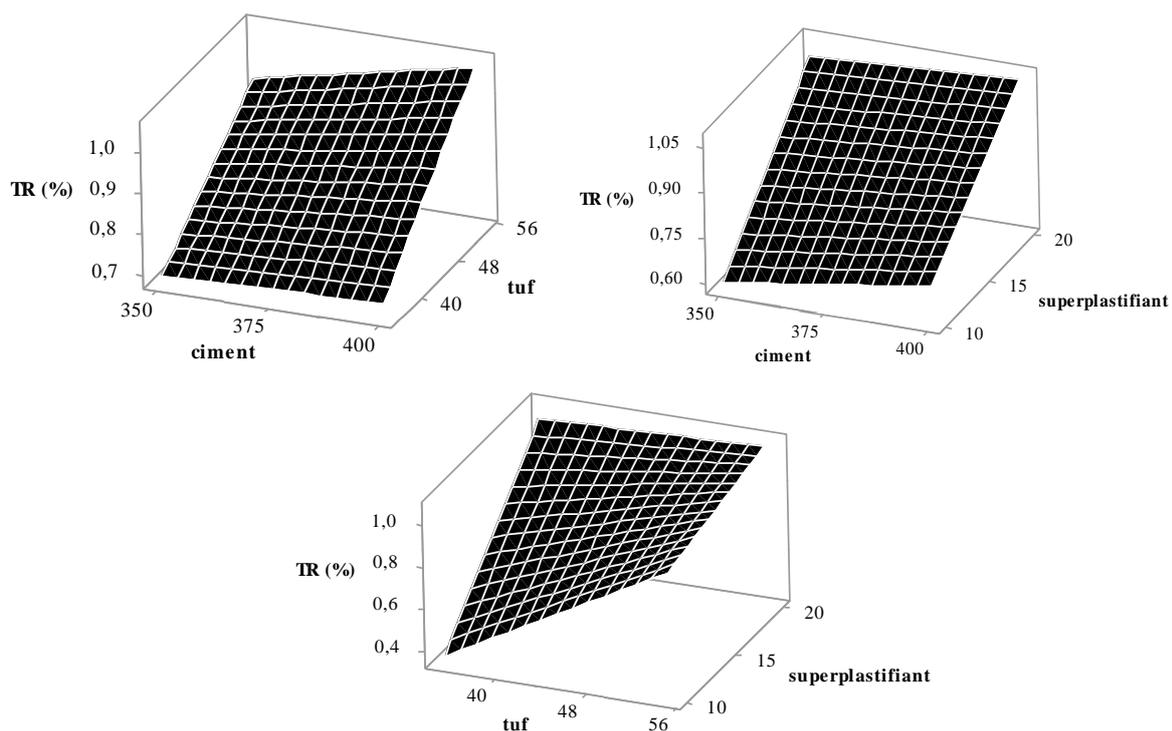


Figure 5.27 : Effet des différents facteurs sur le taux de remplissage à la boîte en L des BAP

5.3.4. Etude de la résistance à la compression

Les résultats des résistances mécaniques à la compression des différents BAP formulés sont compris entre 30 et 46 MPa, figure 5.28. Le plus résistant des bétons de toute la série, est le BAP6. Ces caractéristiques rhéologiques ne sont pas les meilleures, néanmoins elles vérifient tous les critères d'ouvrabilité et de stabilité stipulés. Les valeurs de résistance obtenues sont considérées satisfaisantes et répondent aux attentes fixées au départ. Ces dernières qui étaient choisies en se basant sur un dosage en ciment n'excédant pas 400 kg/m^3 et un rapport E/C supérieur à 0,5.

La représentation graphique des effets des facteurs permet de se rendre compte rapidement de leurs effets sur les réponses, figure 5.29. La résistance à la compression dépend, en premier lieu du ciment dont l'effet est le plus prononcé. En second lieu, il est constaté l'effet positif du superplastifiant avec une influence de moindre importance que celle du ciment. Cela est dû à son pouvoir défloculant qui améliore la fluidité du béton et permet un réarrangement optimal des grains, d'où une compacité meilleure. Pour ce qui est du tuf, son effet est négatif, donc plus la quantité de tuf augmente plus la résistance diminue.

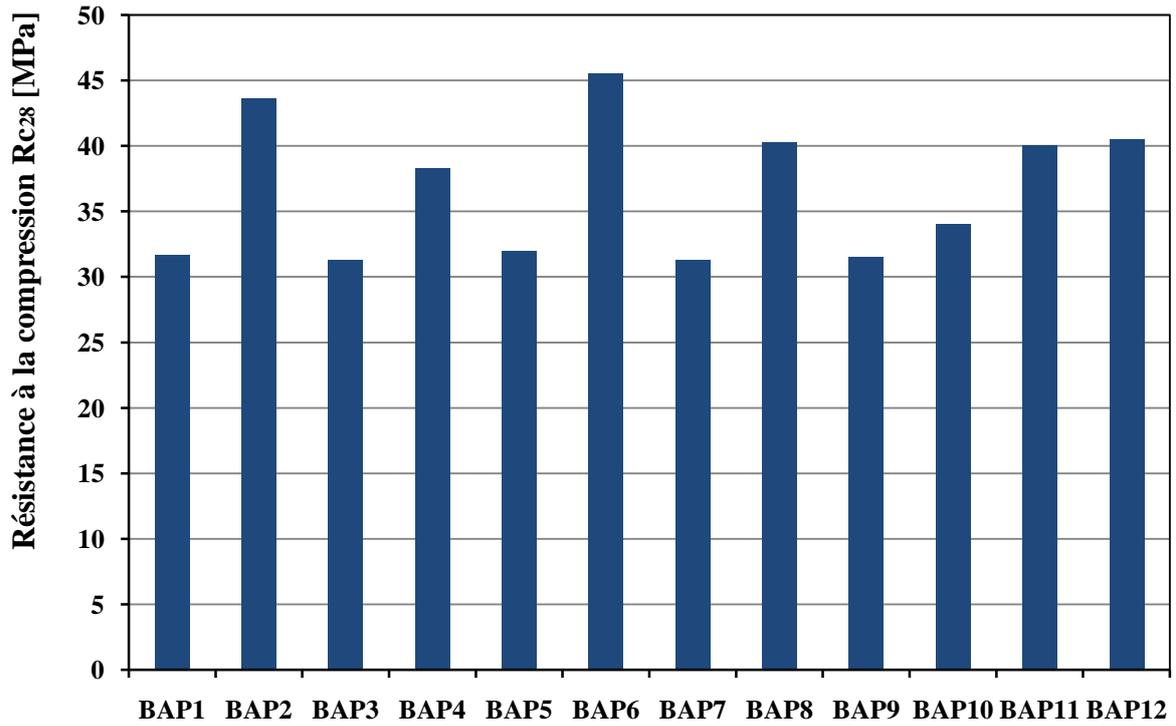


Figure 5.28 : Résistance à la compression des BAP à base de tuf calcaire de Htattba

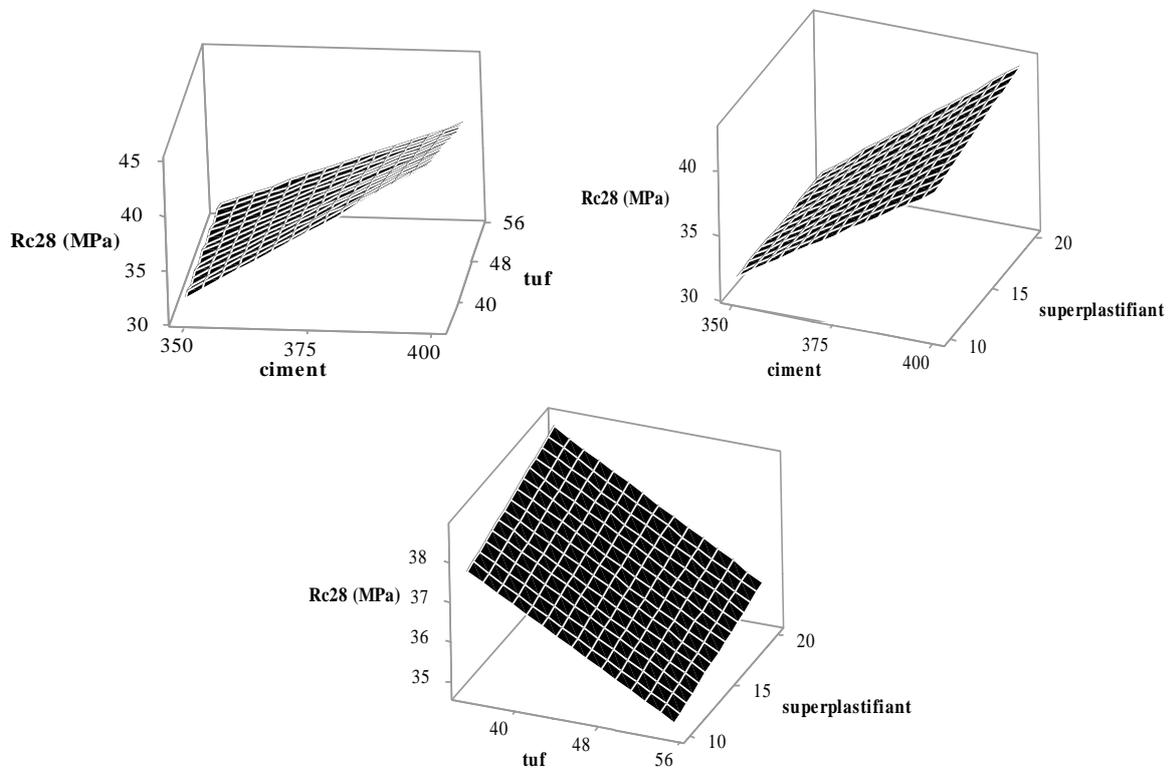


Figure 5.29 : Effet des différents facteurs sur la résistance à la compression des BAP

5.4. Conclusion

L'étude de l'influence du tuf calcaire sur les propriétés des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants à travers la réalisation de cette investigation expérimentale, a permis de déduire certains nombres de constatations.

En effet, l'ajout de tuf dans les bétons ordinaires conduit à une perte de maniabilité considérable à cause de son caractère absorbant et son taux de fines élevé. Grâce à l'usage de superplastifiant, ce problème a été contourné. L'ouvrabilité se trouve améliorer avec même une augmentation des résistances des bétons. A signalé, que l'introduction du tuf calcaire dans les bétons ordinaires présente un optimum à 25 % d'ajout pour lequel les performances mécaniques sont maximales.

Par ailleurs, la perméabilité et les absorptions d'eau des bétons à base de tufs sont plus élevées que celles du béton de référence. Cette faiblesse conduit à une limitation dans leur utilisation qui devrait se faire avec des mesures d'imperméabilisation contre les agents extérieurs, notamment l'eau, ou être réservée pour les parties de structure non exposées.

Concernant, la valorisation des tufs dans les BAP, les résultats obtenus sont très prometteurs avec une possibilité de substitution allant jusqu'à 55 %. Il est tout à fait possible d'utiliser le tuf calcaire dans l'industrie des BAP. Au finale, sur les 12 BAP formulés, cinq ont les caractérisuques rhéologique conformes à ceux stipulées par l'AFCG. Ces BAP sont le BAP6, 7, 8, 10 et le BAP12. Deux d'entre eux sortent du lot. Il s'agit notamment, du BAP6 et du BAP8. Le premier est distingué par sa résistance à la compression la plus élevée égale à 45.5 MPa. Sa composition renferme les dosages maximaux de ciment et de superplastifiant, soit des valeurs de 400 kg/m^3 et de 20 Kg/m^3 respectivement. Concernant le tuf, le BAP6 est composé de 35% de susbstitution partielle du sable. Pour ce qui est du deuxième (BAP8), il est distingué par l'étalement maximal de 690 mm. Pour ce dernier, le tuf est introduit à sa dose maximale de substitution (55%). A souligner que sa résistance est égale à 40.3 MPa, résultat non négligeable.

Grâce à leur taux de fines élevé, les tufs calcaires ont un effet positif sur la rhéologie de ce type de béton. Ainsi, au lieu de tenter de les exploiter dans la confection des bétons usuels (quoi que c'est tout à fait possible comme on l'a mentionné plus haut) avec la nécessité de recourir à un superplastifiant pour surmonter l'handicape causé par leur fraction fines, tirer profit de cette même insuffisance en les valorisant dans les BAP. Si cette fraction pose problème dans le cas des bétons ordinaires, il n'en est rien pour les bétons autoplaçants. Au

contraire, les fines sont très convoitées et nécessaires pour l'augmentation de la quantité de pâte pour s'opposer aux frottements intergranulaires et la libération du mouvement de l'ensemble favorisant ainsi la fluidité.

Par ailleurs, il ya lieu de souligner le grand intérêt économique que représente l'usage de ce matériau local dans la réalisation des projets lancés par l'Etat. Le marché de construction qui connaît un grand essor en Algérie, et la disponibilité des matériaux classiques qui fait parfois défaut, obligent le recours à d'autres alternatives, parmi qui compte le tuf calcaire largement disponible en Algérie.

CONCLUSION GENERALE

Le sable est un matériau très sollicité dans le domaine de la construction en Algérie. La forte demande a engendré une exploitation anarchique des sables des plages du littoral et des lits d'oueds, qui a pour conséquence une grave atteinte à l'écosystème dont la dégradation affecterait irréparablement l'équilibre de l'environnement. De ce fait, un élargissement de la gamme des matériaux susceptibles d'être utilisés, notamment les matériaux locaux, constituerait une solution idoine pour diminuer la tension sur le sable.

L'abondance des tufs calcaires en Algérie et leur utilisation avec succès dans la réalisation des chaussées ont permis d'envisager de les incorporer dans le béton en tant que granulats en substitution partielle au sable. La faisabilité de cette action et son influence sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton ont constitué l'objectif des travaux de cette thèse.

Pour atteindre cet objectif, une importante campagne expérimentale a été entreprise, précédée de la synthèse de l'inventaire des gisements de tufs calcaires répartis sur le territoire national élaboré par le LCTP. L'évaluation de l'abondance de ce matériau ainsi que la prise en compte de ses caractéristiques ont permis de dégager les matériaux représentatifs des gisements existants à retenir pour l'expérimentation envisagée.

A l'issue de l'exploitation d'un répertoire de plus de 80 gisements, il a été possible de tirer des informations utiles. Ces gisements sont localisés, pour plus de la moitié, dans les wilayas du sud et un quart à l'ouest du pays. Le facteur le plus influent dans le cas d'utilisation de ce matériau dans le béton s'est avéré être le taux de fines calcaires. Ce taux est variable d'un gisement à un autre. Néanmoins, les valeurs moyennes caractéristiques dominantes de teneurs en fines sont comprises dans une plage variant de 25 à 35%. Ce constat a amené à retenir pour l'étude, deux tufs calcaires représentatifs de cette distribution, à savoir celui de Boughezoul (27% de fines) et celui de Htattba (34% de fines).

Les principaux résultats expérimentaux obtenus sur les bétons ordinaires à base de tufs calcaires en tant que matériau de substitution, sont récapitulés dans ce qui suit :

A. Bétons usuels sans superplastifiant :

A.1. Comportement rhéologique

L'incorporation de tufs calcaires dans la formulation des bétons usuels par substitution partielle au sable induit :

- une perte de maniabilité qui s'accroît avec l'augmentation du dosage introduit. Les affaissements passent de 9 cm à 3 cm pour les dosages les plus élevés, soit une chute de 2/3. Cette chute serait due à la forte présence de fines dans les tufs et leur caractère absorbant (Coefficient d'absorption élevé en comparaison avec celui du sable) ;

- on remarque une chute du pourcentage d'air occlus grâce aux fines qui viennent compléter le fuseau granulaire en comblant les vides ;
- la réduction de la masse volumique des bétons à cause de la substitution d'une partie du sable par le tuf qui est plus léger.

A.2. Comportement mécanique

- Les résistances à la compression diminuent pour les bétons à base de tufs calcaires (36 MPa) en comparaison avec les performances obtenues avec le béton témoin BO (39 MPa). La réduction est comprise entre 8 et 15 % ;
- les valeurs des résistances à la compression et à la traction obtenues sur ces bétons à base de tufs calcaires font apparaître un optimum à 25 % d'ajout. La présence d'un dosage optimum est un phénomène déjà rencontré avec des études similaires sur d'autres ajouts. Citons à titre d'exemple le taux de fines tolérable dans le sable de concassage est de 15 %, tandis que l'ajout de fines calcaires est limité à 10 %. Au dosage optimal, les fines ont un effet fillers permettant la densification de la matrice en comblant les vides inter-granulaires. De cette manière, la compacité du mélange est améliorée ce qui conduit à une augmentation des résistances. En revanche, au-delà du dosage optimal, les fines ne contribuent plus à combler les vides ; mais conduisent plutôt à l'éloignement des gravillons. Cet éloignement fragilise le squelette granulaire et agit négativement sur les résistances du mélange.

A.3. Comportement physique

- Les tufs calcaires induisent de manière globale des augmentations dans les perméabilités, les absorptions totales et capillaires des bétons. Ces augmentations sont provoquées essentiellement par la nature du tuf caractérisé par une capacité d'absorption élevée ;
- l'augmentation de l'absorption totale atteint une valeur maximale de 19% pour A35 (béton à base de 35% de tuf de Htattba). Alors que pour les bétons contenant 25 % d'ajout, elle est de l'ordre de 15% ;
- l'absorption capillaire présente une augmentation pouvant atteindre 12 fois celle du béton de référence. A l'optimum, elle est comprise entre 8.5 et 10% ;
- La perméabilité est nettement plus élevée avec l'utilisation du tuf de Htattba (ayant le taux de fines et le coefficient d'absorption les plus élevés). Elle est 13 fois supérieure à celle du témoin, pour le tuf de Htattba, et quatre fois dans le cas du tuf de Bougezoul.

A.4. Comportement en milieu agressif (comportement chimique)

- L'appréhension de ce comportement est obtenue par immersion des éprouvettes en milieux acides et sulfatés ;
- la tenue des bétons à base de tufs calcaires est médiocre. La sensibilité du calcaire vis-à-vis des acides et des sulfates rend ces bétons fragiles dans de tels milieux. Leur mise en application doit se faire avec prudence en veillant à leur protection des agressions

extérieures et ne pas les utiliser dans les fondations où il y a contact direct avec le sol (qui peut contenir un excès de sulfate ou autre).

B. Bétons usuels avec superplastifiant :

B.1. Comportement rhéologique

- Les mêmes bétons à base de tufs calcaires sont confectionnés avec l'addition de superplastifiant pour pallier au problème de perte de maniabilité induit par le taux de fines élevé des tufs. A cet effet, des maniabilités similaires à celle du témoin sont obtenues avec l'introduction de dosages usuels de fluidifiant (0.8 à 1.2 %).

B.2. Comportement mécanique

- Le recours au superplastifiant était très bénéfique pour les résistances mécaniques (compression et flexion). Les gains sont tels qu'ils ont atteint des valeurs de 30% pour la compression et 50% pour la flexion. Cette amélioration est obtenue grâce au pouvoir de défloculation des fines du fluidifiant qui permet un réarrangement granulaire débouchant sur une compacité améliorée ;
- le taux optimal de 25% d'ajout a été toujours observé avec les deux tufs en flexion et en compression.

B.3. Comportement physique

- L'utilisation de fluidifiant a permis, en effet de réduire la perméabilité des bétons. Seulement les valeurs obtenues sont restées en dessus de celles du béton témoin. L'absorption du tuf est trop élevée par rapport à ce qui est recommandé (< 5%) et c'est cela qui fait que les bétons au tuf se caractérisent par des absorptions plus importantes ;
- en revanche, il faut préciser que les niveaux des caractéristiques physiques (perméabilité, absorption totale et capillaire) de ces bétons correspondent à ceux relatifs aux bétons ordinaires (BO) selon les résultats de la littérature. Alors, même s'il y a une chute de ces caractéristiques, les valeurs obtenues restent proches de celles usuelles pour les BO.

Au final, il y a lieu de retenir ce qui suit :

- L'incorporation du tuf calcaire dans le béton en tant que substitut partiel au sable est tout à fait envisageable ;
- son utilisation a induit une perte de maniabilité causée précisément par la forte présence de fines qui nécessite une demande en eau supplémentaire. Cet handicap a impliqué le recours à un superplastifiant afin de défloculer les fines et permettre, à même quantité d'eau, d'obtenir les affaissements désirés. De cette façon les bétons élaborés sont dotés de la même ouvrabilité tout en procurant des gains de performances mécaniques appréciables ;
- le tuf calcaire peut être incorporé dans le béton ordinaire jusqu'à 25 %, en substitution partielle au sable. A cet optimum, la matrice densifiée fait que les performances

mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) des bétons sont très appréciables, surtout avec l'usage conjoint du superplastifiant.

- tenue médiocre de ces bétons en milieux agressifs en comparaison avec le béton de référence en raison de la chaux contenue dans les tufs. L'augmentation du taux de calcaire dans la matrice du béton accentue sa fragilité vis-à-vis des milieux acides et sulfatés.
- a cet effet, son utilisation doit se faire avec prudence vu sa mauvaise tenue en milieu agressif et ses absorptions plus élevées.

L'utilisation du tuf calcaire dans le béton serait tout à fait envisageable à condition de lui assurer une bonne protection contre les agressions extérieures.

Dans cette étude, la teneur en fines des tufs calcaires a été exploitée pour formuler des BAP, et tirer profit de cette propriété qui confère à ce type de béton de meilleures caractéristiques rhéologiques. Le tuf s'est avéré parfaitement approprié pour être utilisé dans la formulation des BAP dont les performances escomptées à l'état frais sont rapidement atteintes. L'utilisation de tufs calcaires à des dosages plus élevés a permis d'avoir des BAP fluides, stables et qui s'écoulent parfaitement à travers les barres de fer de la boîte en L sans blocage. Les BAP obtenus sont conformes aux recommandations de l'Association Française de Génie Civil, AFGC.

Il est mis en exergue la possibilité d'introduire le tuf calcaire jusqu'à 55% de substitution débouchant sur une ouvrabilité conséquente de 690 mm et une bonne résistance à la compression de l'ordre de 40 MPa. A retenir qu'un taux de 55% de substitution présente un intérêt économique et environnemental indéniable en réduisant la quantité de sable considéré « noble » et qui se raréfie.

Perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt et la possibilité d'envisager l'utilisation des tufs comme ajout dans la formulation des bétons. Cependant, ce travail sans précédent, a besoin d'être impérativement confronté à d'autres résultats d'essais à l'échelle nationale et internationale notamment concernant le comportement des bétons à base de cet ajout sous l'effet d'autres agents agressifs. La durabilité de ces bétons doit faire l'objet d'études plus approfondies, notamment à l'échelle microscopique. Les bétons doivent aussi être examinés sous d'autres angles, à savoir leur retrait, le problème d'alcali-réaction. Le caractère évolutif et friable du tuf calcaire doit être aussi examiné avec soin et étudier son impact sur la granulométrie du mélange global.

Par ailleurs, la formulation des BAP par application de la méthode des plans d'expériences doit être plus poussée en établissant des modèles mathématiques pouvant servir à la prédiction de la composition d'un BAP en minimisant les essais. Pour ce faire, d'autres plans sont à envisager pour une modélisation plus fidèle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI 318-95, 1994.** Building code requirements for structural concrete, ACI Manual of concrete practice, Part3: Use of concrete in buildings – Design, specifications, and related topics.
- AFCG, 2000.** Bétons auto-plaçants. Recommandations provisoires. Documents scientifiques et techniques. Association française de Génie Civil.
- Aïtcin Pierre-Claude, 2000.** Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research, volume 30, N° 9, pp 1349 – 1359
- Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S., 2007.** The properties of concrete made with fine dune sand. Construction and Building Materials, volume 21, N° 8, pages 1803–1808
- Alloul B., 1981.** Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d’Algérie en vue de leur valorisation routière. Thèse de doctorat 3ème cycle, université de Paris VI.
- Al Qadi Arabi, N.S., Mustapha Kamal Nasharuddin, Al-Mattarneh Hashem, Qahir, N.S., Qahir, N.S. AL-Kadi, 2009.** Central composite design models for workability and strength of self-compacting concrete. Journal of Engineering and Applied Science, volume 4, N° 3, pages 177–183.
- Al Qadi Arabi N.S. , Kamal Nasharuddin Bin Mustapha, Sivakumar Naganathan, Qahir N.S. Al-Kadi, 2013.** Development of self-compacting concrete using contrast constant factorial design. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, volume 25, N° 2, pages 105–112.
- Améraoui, Z., 2002.** Les tufs d’encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Angulo S. C., Carrijo P. M., Figueiredo A. D., Chaves A. P., John V. M., 2010.** On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. Materials and Structures, volume 43, N°4, pages 519–528.
- ASTM C 642-97, 1997.** Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete.
- ASTM C 33, 2003.** Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02.
- Baron J., Lesage R., 1976.** La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier. Rapport de recherche LPC N° 64. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Baron J. et Sauterey R., 1982.** Le béton hydraulique, connaissance et pratique. Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Baron J., 1996.** Durabilité des bétons. Editeur : Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Baron j. et Ollivier J.P., 1999.** Les béton bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles.
- Batata A., Zerouni M., 1991.** Le béton de sable de dune : ses performances et ses propriétés. Congrès MATLOC 91, Biskra, Algérie, pages 159-165, 3-4 décembre.
- Bédérina M, Khenfer MM, Dheilly RM, Quéneudec M., 2005.** Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. Cement Concrete Research, volume 35, N° 6, pages 1172-9.
- Bedjou S., 2003.** Contribution à la valorisation des déchets de construction : Etude du recyclage des débris de terre cuite. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d’El Harrach.
- Beixing Li, Wang Jiliang, Zhou Mingkai, 2009.** Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low- and high-strength concretes. Construction and Building Materials, volume 23, N° 8, pages 2846–2850.
- Benamara Dalila, Bouzidi Mezghiche, 2010.** Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux locaux «BHP». Courrier du Savoir – N°10, pages 09-14.

- Benna Y., 2005.** Valorisation des sables de dune, Rapport interne CNERIB.
- Ben Dhia M.H., 1983.** Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière. Thèse de doctorat 3ème cycle. Université de Paris VI.
- Ben Dhia M. H., 1998.** Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 213 - janvier-février - réf. 4159 – pages 33-42
- Billberg P., 2001.** Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pages 285-294, 23-25 octobre.
- Boukezzi Lehabab Z., 1997.** Etude des tufs calcaires, utilisation en construction routière. Thèse de Magister. Université d'Oran.
- Boukli Hacene S.M.A., F. Ghomari, F. Schoefs 1 et A. Khelidj, 2009.** Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance à la compression des bétons. Lebanese Science Journal, volume 10, No. 2, pages 81-100.
- Bouras R., 2008.** Rhéologie des bétons auto-plaçants. Thèse de doctorat. Université de Tizi Ouzou.
- Bouziani Tayeb, Madani Bederina, Mourad Hadjoudja, 2012.** Effect of Dune Sand on the Properties of Flowing Sand-Concrete (FSC). International Journal of Concrete Structures and Materials, volume 6, No.1, pages 59-64.
- Bouziani Tayeb, 2013.** Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modeling approach. Construction and Building Materials, volume 49, pages 308–314.
- Chauvin J.J., 1987.** Les sables – guide pratique d'utilisation routière – Synthèse, ISTED.
- Cardon d., Evrard h., Garnier j., 1984.** Préviation de la teneur en fines des sables de concassage. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingenieur, Paris, N° 29, pages 343- 348.
- Celik Tahir and Khaled Marar, 1996.** Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. Cement and Concrete Research, volume 26, N° 7, pages 1121-1130.
- Desmettre Clélia, 2011.** Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques. Thèse de Philosophiae Doctor (ph.d.). Université de Montréal.
- Cherrak M., 2003.** Utilisation des tufs calcaires et sable de dune en technique routière. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- Cherrak M., Morsli M., Bali A., Silhadi K., 2008.** Valorisation de l'utilisation des tufs calcaires en techniques routière. Colloque International «Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures – CMMS08 », Tizi Ouzou, Algérie.
- Cherrak M., Benna Y., Guettache B., 2011 .** Contribution à l'étude de l'effet d'ajout de tufs sur les performances du béton. Rapport Interne CNERIB, Algérie.
- Colombier G., 1988.** Tufs et encroûtements calcaires, utilisation routière. Synthèses. ISTED.
- Coutelas Arnould, 2003.** Petro-archéologie du mortier de chaux gallo-romain essai de reconstitution et d'interprétation des chaînes opératoires : du matériau au métier antique. Thèse de Doctorat. Université PARIS I – Panthéon-Sorbonne, U.F.R. Histoire de l'Art et Archéologie.
- Cortes D.D., H.-K. Kim, A.M. Palomino, J.C. Santamarina, 2008.** Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. Cement and Concrete Research, volume 38, pages 1142–1147
- Debieb F., Kenai S., 2008.** «The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete», *Construction and building Materials*, volume 22, N° 5, pages 886-893.

- Djeziri Djelloul, 2010** . Durabilite du béton hydraulique à base de sable de concassage. Mémoire de Magister. Université Saad Dahleb de Blida.
- Dreux G. et Festa J., 1998**. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Edition Eyrolles.
- Domec, M., Alloul, B., 1980**. Construction des chaussées au Sahara. Rapport technique du Laboratoire central des travaux publics, Alger.
- Donza H., O. Cabrera, E.F. Irassar, 2002**. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, volume 32, pages 1755–1761.
- El Barrak Maher, 2005**. Contribution a l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais. Doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier. Spécialité Génie Civil.
- EN 12 620, 2008**. Granulats pour béton.
- EN 933-8, Année**. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats — Partie 8: Évaluation des fines— Équivalent de sable.
- Fenzy E., 1966**. Particularité de la technique routière au Sahara. Revue générale des routes et aérodromes, N° 411, pages 57–71.
- Ford T., Pedley H. M., 1996**. A review of tufa and travertine deposits of the world. Earth-Science Reviews, volume 41, N° 3, pages 117-175.
- Ghrieb Abderrahmane, Mitiche-Kettab Ratiba, Bali Abderrahim, 2013**. Stabilization and Utilization of Dune Sand in Road Engineering. Arabian Journal for Science and Engineering, volume 39, N° 3, pages: 1517-1529.
- Gmira Ahmed, 2003**. Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment. Thèse de Doctorat. Université d'Orléans.
- Goual₁ I., 2012**. Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application et technique routière. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.
- Goual₂ I., Goual, M.S., Taibi S., Abou-Bekr N. 2012**. Amélioration des propriétés d'un tuf naturel utilisé en technique routière saharienne par ajout d'un sable calcaire. European Journal of Environmental and Civil Engineering, volume 16, N° 6, pages 744–763.
- Goupy J., 2006**. Plans d'expériences : Introduction à Mini Tab.
- Hachichi, A., Boudia, M., Zmali, L., & Belhachemi, D., 2000**. Etude de l'influence du séchage et de l'immersion sur la résistance à la compression des tufs calcaires de la région d'Oran. Conférence internationale de Géo-ingeneering Civil, Université de Science et de technologie Houari Boumediene Alger – Algérie.
- Hall C., 1989**. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. Magazine of Concrete Research. volume 41, N° 147, pages 51-61.
- Hamrouni A., 1975**. Routes économiques et routes à faible circulation. XVème Congrès mondial de la route, Mexico.
- Hayakawa M., Matsuoka Y. and Yokota K., 1995**. Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan. Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pages 381-397.
- Hebhoub H., Aoun H., Belachia M., Houari H., Ghobel E., 2011**. «Use of waste marble aggregates in concrete», Construction and Building Materials, volume 25, N° 3, pages 1167-1171.
- Horta O.S., 1979**. Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechniques routières. Laboratoire de mécanique des sols, Sonatrach Algérie.
- Instruction Interministérielle, 2007**, portant sur les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux.

- Irassar E.F., 2009.** Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. *Cement and Concrete Research*, volume 39, pages 241 – 254.
- Joudi-Bahri Imène, 2012.** Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine, France & de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Joudi-Bahri Imène, André Lecomte, Mongi Ben Oueddou, Taoufik Achour, 2012.** Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cement & Concrete Composites*, volume 34, pages 771–780.
- Kaoua A., 2008.** Détermination de modèles prédictifs des caractéristiques essentielles du béton de la région de M'sila: Plan d'expériences. Mémoire de magistère. Université Mohamed Boudiaf de M'sila.
- Kenai S, Debieb F., 2010.** Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés. *Materials and Structures*, volume 44, N° 4, pages 815–24.
- Kettab Ratiba, 2007.** Contribution à la valorisation du sable de dunes. Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Nationale Polytechnique d'El Harrach.
- Khayat, K.H., Ghezal, A., Hadriche, M.S., 1999.** Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete. *Materials and Structures*, volume 32, pages 679–686.
- Laquerbe M., I. Cisse, G. Ahouansou, 1995.** Pour une utilisation rationnelle des graveleux latéritiques et des sables de dunes comme granulats à béton : Application au cas du Sénégal. *Materials and Structures*, volume 28, pages : 604-610.
- Larbi L. A., 1993.** Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete. *Heron*, volume 38, N° 1, pages 1-69.
- L.C.T.P, Laboratoire Central des Travaux Publics, 2006.** Etude de promotion et vulgarisation des techniques d'entretien en matériaux locaux : Gisements de tufs inventoriés, Ministère des Travaux Publics (MTP), Algérie.
- Lee Creighton, Jacques Goupy, 2006.** Introduction aux plans d'expériences. Edition DUNOD.
- Ltifi Mounir, Nejib Ben Jamaa, Nizar Bel hadj Ali , Khaoula Akrouf, 2005.** Etude comparative des bétons hydrauliques à base de sable siliceux et sable calcaire de concassage. Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre, Oran.
- Makhloufi a, E.H. Kadri b, M. Bouhicha, A. Benaissa, 2012.** Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution. *Construction and Building Materials*, volume 26, N° 1, pages 497–504.
- Malier Yves, 2006.** D'Auguste, empereur de Rome, aux nanotechnologies ou la singulière histoire des progrès du béton. La jaune et la rouge, Revue mensuelle de l'association des anciens élèves de l'école polytechnique, N°614 Avril, Les travaux publics.
- Menadi B., 2008.** Performance du mortier et béton a base de filler calcaire. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Blida1.
- Menadi B., Kenai S., Khatib J., Aït-Mokhtar A., 2009.** Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Construction and Building Materials*, volume 23, N° 2, pages 625-633.
- Martin Michel, 1998.** Une technologie appropriée pour un habitat économique amélioré. *SUD Science et Technologie*, N° I.
- Ministère de l'énergie et des mines, 2009.** Bilan des activités minières.
- Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, 2000.** Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement Concrete Research*. Volume 30, N° 4, pages 623–34.

- Morsli M., 2007.** Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharien. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Morsli M., Boutemeur R., Cherrak M., Bali A., 2013.** Co-valorisation par mélange d'un tuf calcaire et d'un sable de dune de la région de Ouargla : Utilisation en Technique Routière Saharienne. Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, N° 6.
- Neville Adam, 2000.** Propriétés des bétons. Edition Eyrolles.
- Neville Adam, 2004.** The confused world of sulfate attack on concrete. Cement and Concrete Research, volume 34, pages 1275–1296.
- Na 1966 adoptée en 2009 équivalente à la EN 1008 (juillet 2003). Eau de gâchage pour bétons - spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton.**
- NA 436, 1989.** Béton frais compacté - détermination de la masse volumique (équivalente à la norme ISO 6276:1982 29/11/1989)
- NA 1946, 1992.** Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure de pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton (équivalente à la norme NF P 18-353:1985 29/09/1992)
- NA 455, 2006.** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Evaluation des fines. Equivalent de sable.
- NA 5113, 2009.** Granulats pour béton.
- NA 5043, 2007.** Granulats : élément de définition, conformité et codification.
- NA 1948, 2006.** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Evaluation des fines. Essai au bleu de méthylène.
- NA 2608, 1992.** Granulats. Mesure du coefficient de friabilité des sables
- NF B 10-502, 1989.** Produits de carrières, Pierre calcaires, Mesure de l'absorption d'eau par capillarité, Norme française.
- Nagataki S. and Fujiwara H., 1995.** Self compacting property of highly flowable concrete. Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pages 301-314.
- Nehdi M., Mindess S., Aïtcin P.C., 1996.** Optimisation of high-strength limestone filler cement mortars. Cement and Concrete Research, volume 26, N° 6, pages 883-893.
- Nepomucenoa M., Pereira-de-Oliveira L. A., Lopes S.M.R., 2014. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. Construction and Building Materials, Volume 26, N° 1, pages 317-326.**
- Netterberg F., 1969.** The geology and engineering properties of South African calcretes. Ph.D. Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg.
- Oldache El Hadj, 1988.** Contribution à l'étude de la fixation des dunes dans les régions d'El Mesrane, Wilaya de Djelfa et de Boussaâda. Thèse de Magister.
- Ozbay E., A. Oztas, A. Baykasoglu, H. Ozbebek, 2009.** Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. Construction and Building Materials, volume 23, N° 2, pages 694–702.
- Peltier R., 1959.** Le rôle du laboratoire dans la technique routière saharienne. Revue générale des routes et aérodromes, Numéro spécial Sahara, N°329, pages 165-168.
- Pye K., 2009.** Aeolian Sand and Sand Dunes, Chapter 5: The Formation of Sand Seas and Dune Fields. Springer, pages: 141-173.

- Sedran T., 1995.** Les bétons autonivelants. Bulletin LCPC 196, mars-avril, réf. 3889, pages 53-60.
- Sedran T., 1999.** Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Serikma Mourad, Mitiche-Kettab Ratiba, Bali Abderrahim, 2013.** Stabilisation par la chaux des tufs gypseux et gypso-calcaire. Séminaire National sur «les matériaux locaux dans la construction». Ouargla 20 et 21 février .
- Şimşek Barış, Yusuf Tansel İç, Emir H. Şimşek, 2013.** A TOPSIS-based Taguchi optimization to determine optimal mixture proportions of the high strength self-compacting concrete. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, volume 125, pages 18–32.
- Soudki, K.A., El-Salakawy, E.F., Elkum, N.B., 2001.** Full factorial optimization of concrete mix design for hot climates. Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, volume 13, N° 6, pages 427–433.
- Assié Stéphan, 2004.** Durabilité des bétons autoplaçants. L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Doctorat spécialité en Génie civil.
- Strouillou R., Alloul B., 1984.** Valorisation routière des tufs d'encroutements en Algérie. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, volume 2, pages 465–469.
- Stewart Jane G., Justin K. Norvell, Maria C. G. Juenger, David Fowler, novembre 2007.** Influence of microfine aggregate characteristics on concrete performance. Journal of Materials and Engineering, volume 19, N° 11, pages 957 – 964.
- Su N., Hsu K.C., Chai H.W., 2001.** A simple mix-design method for self compacting concrete. Cement and concrete Research, volume 31, N° 12, pages 1799-1807.
- Tafraoui Ahmed, 2009.** Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie) : Application aux nouveaux bétons. Doctorat. Université INSA de Toulouse.
- Ramirez J. L., Barcena J. M., Urreta J. I., 1987.** Sables calcaires à fines calcaires et argileuses. Materials and Structure, volume 20, N° 3, pages 202 – 213.
- Recommandation de la RILEM CPC 11.1, 1977.** Mesure de l'absorption d'eau par immersion.
- R'mili A., Ben Oueddou M., 2011.** Incorporation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants. INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, N° : 1O-271. Rabat – Maroc / 23-25 Novembre.
- R'mili A., Ben Oueddou M., 2012.** Valorization of the crushed sand and of the desert sand in the composition of the self compacting concrete. MATEC Web of Conferences 2, EDP Sciences, p 1-9.
- Ruellan A., 1967.** Individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. Cahier ORSTOM, série pédologie, volume V, N° 4.
- Vial Y.M., 1978.** Sahara, milieu vivant. Collection Hatier.
- Zami M. S., Lee A, 2008.** Using earth as a building material for sustainable low cost housing in Zimbabwe. The Built & Human Environment Review, volume 1, pages 40-46.
- Zoght M.F., 1979.** Sand dunes fixation, afforestation and exploitation. Damas ACSAD.
- XP P18-545. 2004.** Granulats Éléments de définition, conformité et codification.

