



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Thèse en cotutelle
Présentée pour l'obtention du Titre de
Docteur
de l'Université de Lorraine, France
&
de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Spécialité : Génie Civil

par
Imène Joudi-Bahri

**Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des
bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien**

Soutenue publiquement à Tunis le
10 novembre 2012

Devant le Jury :

Hedi Hassis	Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis	Président
Luc Courard	Professeur, Université de Liège, Belgique	Rapporteur
Nejib Ben Jamaa	Maître de Conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Gabes	Rapporteur
Mongi Ben Ouezdou	Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis	Encadreur
André Lecomte	Professeur, Université de Lorraine, Nancy	Encadreur
Imen Kallel-Kamoun	Maître de Conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	Examineur
Aouicha Beddey	Directrice Générale CETEC, Tunis	Invitée

Thèse en cotutelle
Présentée pour l'obtention du Titre de
Docteur
de l'Université de Lorraine, France
&
de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Spécialité : Génie Civil

par
Imène Joudi-Bahri

**Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des
bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien**

Soutenue publiquement à Tunis le
10 novembre 2012

Devant le Jury :

Hedi Hassis	Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis	Président
Luc Courard	Professeur, Université de Liège, Belgique	Rapporteur
Nejib Ben Jamaa	Maître de Conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Gabes	Rapporteur
Mongi Ben Ouezdou	Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis	Encadreur
André Lecomte	Professeur, Université de Lorraine, Nancy	Encadreur
Imen Kallel-Kamoun	Maître de Conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	Examineur
Aouicha Beddey	Directrice Générale CETEC, Tunis	Invitée

Avant propos

La présente thèse a été menée dans le cadre d'une cotutelle entre l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et l'Université Henri Poincaré de Nancy (UHP). Je tiens à remercier tout particulièrement mes directeurs de thèse Monsieur Mongi BEN OUEZDOU et Monsieur André LECOMTE. Je remercie également le Ministère de l'Enseignement Supérieur Tunisien qui m'a offert l'occasion de passer trois séjours en France au sein du Département de Chimie et Physique des Solides et des Surfaces (CP2S) et ce en m'accordant chaque fois, une bourse d'alternance. Je remercie aussi le Laboratoire de Génie Civil « LGC » de l'ENIT de m'avoir pris en charge pour certains transports.

Mes vifs remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur Mongi BEN OUEZDOU, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, pour son aide et sa confiance. Son soutien incessant et ses conseils m'ont beaucoup aidé à progresser et à franchir tous les obstacles. Sa capacité d'organisation et de planification m'a permis de bien gérer les différentes démarches rencontrées durant cette étude. Son excellent anglais a contribué à une meilleure traduction des versions françaises de mes articles.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur André LECOMTE, Professeur à l'Université Henri Poincaré, pour son aide si précieuse, sa gentillesse et sa disponibilité. Mes séjours en France m'étaient très bénéfiques. J'ai beaucoup appris à ses côtés grâce à ses conseils avisés, sa patience, son immense expérience dans le domaine et sa compétence professionnelle. Il m'a appris les qualités nécessaires pour le bon déroulement des essais expérimentaux relatifs aux granulats et aux bétons ainsi que le sens des interprétations immédiates des résultats obtenus. Les séjours passés au sein de l'IUT de Nancy Brabois sous sa direction ont représenté pour moi une expérience très enrichissante et pleine d'intérêts. Je n'oublierai jamais les énormes efforts qu'il a effectué dans les deux pays pour l'aboutissement de cette recherche et les corrections qu'il a apportées à ce mémoire tant au niveau de la rédaction qu'au niveau du travail. J'ai beaucoup bénéficié de son esprit scientifique et de ses idées lors de la rédaction de mon premier article, de l'importance qu'il accorde à la précision, à la rigueur et à la perfection du travail. Je souhaite aussi lui témoigner toute ma reconnaissance pour ses encouragements permanents, son soutien et sa confiance durant toutes ces années de recherches. Ce travail ne serait jamais achevé sans sa collaboration, sa ténacité et ses connaissances enrichissantes.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du Jury : Monsieur Hédi HASSIS d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse, Monsieur Néjib BEN JAMAA et Monsieur Luc COURARD de bien vouloir accepter de rapporter ce travail ainsi que Madame Imen Kallel-Kamoun d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Je remercie également Madame Aouicha BEDDAY, Directrice du Centre d'Essais et des Techniques de Construction « CETEC », pour son aide à l'encadrement de mes travaux

de recherches, de m'avoir accueilli au sein de la section Béton, de m'avoir fourni certains matériels nécessaires à mes travaux expérimentaux et d'avoir honoré de sa participation avec les membres du jury en tant qu'invitée.

Je remercie les Grandes Carrière du Nord « GCN », en particulier Madame Salima STA, Directeur Central Commerciale, et Monsieur Abdelhamid ZINE EL-ABIDINE, Directeur Général Adjoint Chargé de l'Activité Granulats, de m'avoir élaboré un sable spécifique à l'étude, de m'avoir fourni et livré à titre gracieux tous les granulats utilisés dans cette thèse.

Je remercie également la Cimenterie CAT COLACEM pour la fourniture du ciment utilisé lors de cette étude, en particulier Monsieur Lotfi TRIFI, Responsable Assistance Technique, pour son accueil chaleureux au laboratoire de la cimenterie et pour son aide dans la caractérisation des propriétés du ciment fourni.

Je remercie aussi la société SIKA TUNISIENNE de m'avoir fourni les produits utilisés dans cette étude.

Les travaux de ma thèse se sont déroulés au laboratoire de Génie Civil (LGC) de l'ENIT et à la section Béton du CETEC. A cette occasion, j'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Farhat ARAYEDH, Chef Service des Moyens Généraux du CETEC, pour la fabrication de certains matériels spécifiques à l'étude et Monsieur Fethi NOUIRA pour sa disponibilité et son aide si précieuse. Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Mohamed ADDED et à tout le personnel de la section Béton du CETEC, en particulier Monsieur Belhassen JENDOUBI, Monsieur Khaled HOUAIDI et Madame Nessrine CHIHAOUI et à tout le personnel du LGC de l'ENIT, en particulier Madame Zeineb ROUISS et Monsieur Mohamed Ali SAKKAR.

Je remercie Monsieur Abdelhamid R'MILI, Maître Assistant à l'Ecole Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis « ESSTT », de m'avoir fourni certains matériels nécessaires aux essais.

Je remercie Mesdemoiselles Nejeh AKERMI et Hazar CHATTI, officières élèves-ingénieurs de l'Académie militaire pour leur contribution à certains nombres d'essais pendant la première phase de l'étude.

Je dédie ce mémoire à:

Mes chers parents et toute ma famille, pour le soutien et la patience qu'ils ont témoignés :

Mon cher père Mohamed Taher et ma chère mère Fatma pour leur amour, leur gentillesse, leurs encouragements continus ainsi que leurs efforts et leur grand sacrifice.

Mes chers frères Marwène et Hichème pour leur soutien, leur sourire et leur humour qui me donnaient la force de continuer à avancer, en particulier mon cher frère Arkène qui

m'a beaucoup aidé tout au long de mes années d'études et sur lequel je pouvais toujours compter. Je le remercie du fond du cœur pour son dévouement toujours constant.

Ma chère sœur Jihène qui m'a donné beaucoup d'amour, de confiance et de soutien moral et qui a partagé tous les moments de ma vie ainsi que mes joies et mes tristesses.

Mon mari Anis pour son soutien et sa compréhension. Son aide fut précieuse surtout pendant les premières années de recherches.

Ma fille Salma qui a illuminé ma vie et qui m'a offert l'occasion de vivre de très beaux moments.

Mon beau père Abdelkarim ; mes belles sœurs Houyem, Bédia, Néjia, Hend, Olfa et Jihen; mes beaux frères Mohamed, Ahmed et Riadh ; mes neveux Ayoub et Ahmed ; mes nièces Fatma, Mariem et Soulefa.

L'âme de mon cher oncle Mohamed Jalel AFSA, Docteur en Ecologie et Ingénieur Expert auprès des Instances Internationales pour les évaluations et le suivi des projets de développement, pour sa grande générosité envers moi, son amour éternel, sa confiance et son soutien continu tout au long de mes années d'études. Toute ma reconnaissance s'adresse aussi à sa chère femme Faouzia et sa charmante fille Olfa.

L'âme de ma belle mère Hédia, qui m'a toujours encouragée et soutenue moralement surtout pendant mes séjours en France.

L'âme de ma grand-mère Khadija qui m'a beaucoup aimée et m'a toujours souhaité le bonheur, la réussite et le succès.

Toute ma grande famille et tous mes chers amis.

Enfin, j'espère que tous ceux dont je n'ai pas cité le nom veillent bien me le pardonner !

Imène Joudi-Bahri, Septembre 2012

Table des matières

Avant propos	i
Listes des figures	ix
Liste des tableaux	xiv
Chapitre 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Contexte général de la recherche.....	3
1.2 Particularité des matériaux calcaires de carrière	5
1.3 Intérêts de la recherche	7
1.3.1 Intérêts général.....	7
1.3.2 Intérêts scientifiques	7
1.4 Contenu du mémoire	7
Chapitre 2 : ÉTAT DE L'ART	11
2.1 Introduction	13
2.2 Travaux généraux	13
2.2.1 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les mortiers et les bétons courants.....	13
2.2.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les mortiers et les bétons autoplaçants	24
2.2.3 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les mortiers et les bétons à hautes performances.....	29
2.3 Travaux tunisiens	29
2.3.1 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les mortiers et les bétons courants.....	29
2.3.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les mortiers et les bétons autoplaçants	36
2.4 Les bétons ordinaires et leurs constituants	38
2.4.1 Les granulats	38
2.4.2 Le ciment	41
2.4.3 Les adjuvants	43
2.4.4 L'eau	43
2.5 Les bétons autoplaçants	43
2.5.1 Définition	43
2.5.2 Propriétés des BAP à l'état frais	44
2.5.3 Propriétés des BAP à l'état durci.....	45

2.5.4 Conditions de réalisation des BAP	45
2.6 Conclusion	47
Chapitre 3 : IDENTIFICATION ET PREPARATION DES MATERIAUX	49
3.1 Introduction	51
3.2 Choix des matériaux	51
3.2.1 Choix de la carrière	51
3.2.2 Choix des granulats.....	61
3.2.3 Ciment.....	62
3.2.4 Adjuvant.....	63
3.3 Préparation des matériaux de l'étude	63
3.3.1 Lavage du sable initial et récupération des fillers calcaires.....	63
3.3.2 Composition des sables à différents taux de fillers.....	64
3.4 Caractérisation des propriétés.....	68
3.4.1 Granulats	68
3.4.1.1 Propriétés usuelles	68
3.4.1.2 Propriétés physiques	70
3.4.1.3 Propriétés mécaniques	72
3.4.1.4 Propriétés chimiques et minéralogiques	72
3.4.1.5 Propriétés spécifiques à l'utilisation de BétonLabPro2 : compacité des granulats.....	74
3.4.2 Fillers calcaires	75
3.4.2.1 Propriétés usuelles	75
3.4.2.2 Propriétés physiques	75
3.4.2.3 Propriétés chimiques et minéralogiques	76
3.4.2.4 Propriétés spécifiques à l'utilisation de BétonLabPro2.....	77
3.4.3 Ciment.....	80
3.4.3.1 Propriétés usuelles	80
3.4.3.2 Propriétés physiques	80
3.4.3.3 Propriétés mécaniques	80
3.4.3.4 Propriétés chimiques et minéralogiques	81
3.4.3.5 Propriétés spécifiques à l'utilisation de BétonLabPro2.....	82
3.4.4 Superplastifiant	84
3.5 Conclusion	85

Chapitre 4 : FORMULATIONS ET FABRICATIONS DES BETONS CALCAIRES ET DES MORTIERS DE BETONS EQUIVALENTS (MBE) 87

4.1 Introduction	89
4.2 Plan de l'étude	89
4.3 Choix de la méthode de formulation des mélanges: le logiciel BétonLabPro2	92
4.3.1 Présentation du logiciel BétonlabPro2.....	93
4.3.2 Principaux modèles associés à BétonlabPro2.....	93
4.4 Formulations théoriques	101
4.4.1 Formulation à l'aide du logiciel BétonlabPro2	101
4.4.2 Formulation selon la méthode Dreux-Gorisse	110
4.5 Mortiers de bétons équivalents (MBE).....	112
4.5.1 Présentation de la méthode MBE.....	112
4.5.2 Principe de la méthode MBE	112
4.5.3 Calcul de la composition de MBE	113
4.5.4 Composition des MBE réalisés.....	125
4.5.5 Fabrication des MBE	117
4.5.6 Interprétation des résultats obtenus	120
4.6 Préparation des matériaux avant chaque gâchée	121
4.7 Fabrication des bétons	122
4.7.1 Calcul des formules	122
4.7.2 Fiches expérimentales des mélanges	125
4.7.3 Réalisation des gâchées	129
4.7.4 Bétons sans superplastifiant	131
4.7.5 Bétons avec superplastifiant	133
4.7.6 Bétons autoplaçants	133
4.8 Conclusion.....	134

Chapitre 5 : PROPRIETES DES BETONS CALCAIRES 135

5.1 Introduction	137
5.2 Propriétés à l'état frais.....	137
5.2.1 Affaissement	141
5.2.2 Air Occlus	145
5.2.3 Ressuage	146
5.2.4 Compacité	147
5.2.5 Masse volumique réelle	149

5.3 Propriétés à l'état durci.....	151
5.3.1 Résistance à la compression.....	153
5.3.2 Résistance à la traction	159
5.4 Mesures des variations dimensionnelles	164
5.4.1 Préparation et fabrication du matériel.....	165
5.4.2 Fabrication et conservation des éprouvettes	166
5.4.3 Résultats et interprétations.....	168
5.5 Conclusion.....	173
Chapitre 6 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	175
Bibliographie	181
Résumé	193

Liste des figures

Fig. 2.1 : Performances mécaniques des bétons à différents taux de poussières (Çelik et al 1996)	16
Fig. 2.2 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières ajoutées (Çelik et al,1996) ...	16
Fig. 2.3 : Teneur en air et densité des bétons frais à différents taux de fillers (Sadhouri et al, 2009).....	17
Fig. 2.4 : Résistance à la compression des mélanges à différents taux de fillers (Sadhouri et al, 2009). À gauche le mélange BGK et à droite le mélange BGS	18
Fig. 2.5 : Consistance des pâtes de ciment en fonction du pourcentage de substitution (Guemmadi et al, 2008)	19
Fig. 2.6 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression des pâtes de ciment (Guemmadi et al, 2008)	19
Fig. 2.7 : Variation du rapport eau/ciment en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi et al, 2008).....	20
Fig. 2.8 : Variation de la densité réelle en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi et al, 2008).....	20
Fig. 2.9 : Variation de l'air en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi et al, 2008)....	20
Fig. 2.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi et al, 2008).....	21
Fig. 2.11 : Déformation des mortiers sans fillers ou avec remplacement partiel de 10 % de ciment par des fillers calcaires en masse. (Bentz et al, 2008).....	23
Fig. 2.12 : Déformation des mortiers remplacés par 10 % en masse de fillers calcaires, et du mortier de contrôle (sans fillers) (Bucher, 2009)	23
Fig. 2.13 : Système de filtration des déchets de carrières (marquage circulaire) et récupération sous forme de poudres (marquage rectangulaire) (Felekoglu, 2007).....	25
Fig. 2.14 : Résistance à la compression des pâtes de ciments (Felekoglu, 2007)	26
Fig. 2.15 : Résistance à la compression des BAP, le sable est remplacé partiellement par les fillers de carrières (Tarun et al, 2005)	28
Fig. 2.16 : Résistance à la compression des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C. (Bedday, 2000).....	31
Fig. 2.17 : Résistance à la traction des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C. (Bedday, 2000).....	31
Fig. 2.18 : Retrait en fonction du pourcentage de fines	32
Fig. 2.19 : Situation des carrières tunisiennes étudiées (Achour, 2007)	35
Fig. 2.20 : Performances mécanique des bétons calcaires (Achour, 2007).....	35
Fig. 2.21 : Courbes d'étalement au cône d'Abrams des BAP pour les différentes combinaisons de sable roulé et de sable de concassage	37
Fig. 2.22 : Résistance à la compression des BAP réalisés par Rmili (Rmili, 2010)	37

Fig. 2.23 : Résistance à la traction des BAP réalisés par Rmili (Rmili, 2010)	37
Fig. 3.1 : Répartition géographique des régions [Achour, 2007]	52
Fig. 3.2 : Répartition géographique des carrières industrielles de granulats concassés en Tunisie [Zneidi, 2007]	53
Fig.3. 3.a : Vue d'ensemble de la carrière de Jbel Ressas et du front de taille	55
Fig. 3.3.b : Détail de l'exploitation de la carrière Jbel Ressas	55
Fig. 3.4 : Localisation de la carrière Jbel Ressas [Google Maps - ©2012 Google]	56
Fig. 3.5 : Cadre géologique du secteur d'étude extraite de la carte géologique au 1/50 000 de Grombalia [Bujalka et al., 1971].	58
Fig. 3.6 : Cadre structural du massif Ressas [Turki, 1985]	59
Fig. 3.7 : Coupe synthétique transversale NW-SE de la série exploitée [Zneidi, 2007]	60
Fig. 3.8 : Roche calcaire de Jbel Ressas	61
Fig. 3.9 : Conservation du sable calcaire	62
Fig. 3.10 : Conservation du ciment CEM I 42,5 N	62
Fig. 3.11 : Fillers calcaires après récupération	63
Fig. 3.12 : Conservation de la fraction grenue du sable lavé	64
Fig. 3.13 : Diagramme de fabrication des sables à différents taux de fillers	65
Fig. 3.14 : Constituants des sables fabriqués (%)	66
Fig. 3.15 : Granularité des matériaux - Courbes	68
Fig. 3.16 : Diffractogramme du calcaire de Jbel Ressas	73
Fig. 3.17 : Dispositif de mesure de la compacité \square des fractions grenues	74
Fig. 3.18 : Diffractogramme des fillers calcaires de Jbel Ressas	77
Fig. 3.19 : Compacité des fillers avec différents pourcentages de ciment	78
Fig. 3.20 : Compacité des fillers avec différents pourcentages de SP	79
Fig. 3.21 : Analyse chimique du CEM I 42,5 N	82
Fig. 3.22 : Compacité du ciment en fonction du pourcentage de SP	84
Fig. 4.1 : Diagramme du plan expérimental retenu	91
Fig. 4.2 : Propriétés des matériaux. Exemple du gravillon G 4/8	101
Fig. 4.3 : Propriétés des matériaux. Exemple du sable S12	102
Fig. 4.4 : Propriétés des matériaux. Exemple du ciment CEM I 42.5 R	103
Fig. 4.5 : Propriétés du superplastifiant	103
Fig. 4.6 : Compacité d'une fraction grenue. Exemple du gravillon G 4/8	104
Fig. 4.7 : Compacité d'une fraction fine. Exemple du sable S12	105
Fig. 4.8 : Squelette du matériau. Exemple du gravillon G 4/8	105
Fig. 4.9 : Exemple de sélection des constituants du mélange S24Ai	106

Fig. 4.10 : Exemple d'optimisation d'un mélange granulaire selon la démarche Baron-Lesage	106
Fig. 4.11 : Exemple d'optimisation d'un mélange en fixant les proportions des constituants et en imposant certaines propriétés	107
Fig. 4.12 : Simulation du béton. Mélange S24A1	108
Fig. 4.13 : Résultats d'une simulation. Propriétés obtenues du mélange S24A1	108
Fig. 4.14 : Autres propriétés pouvant être prédites par le logiciel	109
Fig. 4.15 : Exemple d'une granularité du mélange	109
Fig. 4.16 : Exemple d'un diagramme de remplissage	110
Fig. 4.17 : Courbes granulaires des mélanges, selon BétonlabPro2 et Dreux-Gorisse	111
Fig. 4.18 : Dimension du cône MBE par rapport au cône d'Abrams [Projet national CALIBE, 2004].....	113
Fig. 4.19 : Matériels utilisés	118
Fig. 4.20 : Mesure de l'affaissement d'un MBE	119
Fig. 4.21 : Mesure de l'étalement d'un MBE.....	119
Fig. 4.22 : Relation entre E/C et la dose de superplastifiant pour chaque MBE.....	120
Fig. 4.23 : Relation entre E/(C+FC) et la dose de superplastifiant pour chaque MBE	120
Fig. 4.24 : Corrélacion entre affaissement des bétons et étalements MBE.....	121
Fig. 4.25 : Exemple d'une fiche de formulation	122
Fig. 4.26 : Exemple de mesure d'affaissement au cône d'Abrams	130
Fig. 4.27 : Moules remplis	130
Fig. 4.28 : Démoulage des éprouvettes	131
Fig. 4.29 : Conservation des éprouvettes sous eau	131
Fig. 5.1 : Comparaison entre affaissement mesuré et affaissement prédit par BTLP2 pour les bétons courants.....	144
Fig. 5.2 : Comparaison entre affaissement mesuré et affaissement prédit par BTLP2 pour les bétons superplastifiés et les BAP	145
Fig. 5.3 : Comparaison entre air mesuré et air prédit par BTLP2	146
Fig. 5.4 : Ressuage à 1h des bétons courants	147
Fig. 5.5 : Compacité des différents bétons en fonction de la quantité de fillers calcaires	148
Fig. 5.6 : Évolution du rapport E_{eff}/C_{eq} avec la quantité de fillers.....	149
Fig. 5.7 : Variation de la masse volumique réelle en fonction du pourcentage de fillers calcaires dans le sable	150
Fig. 5.8 : Variation de la masse volumique réelle des bétons en fonction de la quantité de fillers calcaires.....	150
Fig. 5.9 : Presse de compression pour éprouvettes 16 x 32 cm.....	154
Fig. 5.10 : Prise en compte des valeurs réelles de p et q dans les propriétés des matériaux : Exemple du gravillon 4/8	156

Fig. 5.11 : Relation entre la résistance R_{c28} et la résistance de la matrice f_{cm28}	157
Fig. 5.12 : Résistance à la compression de tous les bétons formulés en fonction de la quantité de fillers.....	158
Fig. 5.13 : Résistance à la traction par fendage.....	160
Fig. 5.14 : Comparaison entre la résistance à la traction et la résistance à la compression des différents mélanges. Ajustement de différents modèles empiriques.....	162
Fig. 5.15 : Résistance à la traction des différents bétons formulés en fonction de la quantité de fillers.....	163
Fig. 5.16 : Exemple d'un plan de rupture en fendage d'un béton courant	164
Fig. 5.17 : Bâti de mesures	165
Fig. 5.18 : Fixation de l'éprouvette au fond	165
Fig. 5.19 : Fond et support métalliques	166
Fig. 5.20 : Schéma des moules	166
Fig. 5.21: Epreuves après coulage	167
Fig. 5.22 : Fermeture de l'extrémité de l'éprouvette par un film d'aluminium adhésif	167
Fig. 5.23 : Découpe du PVC après 28 jours	167
Fig. 5.24: Conservation des éprouvettes emballées	168
Fig. 5.25 : Conservation des éprouvettes dans l'eau	168
Fig. 5.26 : Conservation des éprouvettes à l'air ambiant	168
Fig. 5.27 : Exemple de mesure des variations dimensionnelles.....	169
Fig. 5.28 : Variations dimensionnelles : retrait dans l'air et expansion dans l'eau. (a) bétons courants ; (b) bétons superplastifiés	169
Fig. 5.29 : Variations massiques des bétons dans l'air et dans l'eau. (a) bétons courants ; (b) bétons superplastifiés	170
Fig. 5.30 : Variations dimensionnelles des bétons protégés pendant 28 jours: retrait endogène et retrait de dessiccation dans l'air à partir de 28 jours. (a) bétons courants. (b) bétons superplastifiés.....	172
Fig. 5.31. Variations massiques des bétons protégés pendant 28 jours puis dans l'air. (a) bétons courants. (b) bétons superplastifiés.....	172

Liste des tableaux

Tab. 2.1 : Spécification des sables à béton selon la norme NT 21.30.....	39
Tab. 2.2 : Spécifications des gravillons à béton selon la norme NT 21.30.....	40
Tab. 2.3 : Désignation des différents ciments en fonction de leur composition	42
Tab. 2.4 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe	42
Tab. 3.1 : Subdivision du pays en régions et gouvernorats [MEHAT, 2000].....	52
Tab. 3.2 : Caractéristiques des différentes carrières [Bedday ; Added].....	54
Tab. 3.3 : Catégories des sables selon la norme NF EN 12620	66
Tab. 3.4 : Spécification des sables, selon la norme NF XP P 18-545 – Article 10.....	67
Tab. 3.5 : Choix des granulats à béton selon NF XP P 18-545.....	67
Tab. 3.6 : Granularité des matériaux – Passants aux différents tamis.....	69
Tab. 3.7 : Caractéristiques des différents sables	70
Tab. 3.8 : Propriétés physiques des matériaux	71
Tab. 3.9 : Composition chimique du calcaire Jbel Ressay	73
Tab. 3.10 : Compacités réelles Φ et compacités virtuelles β_i des fractions $> 80\mu\text{m}$	75
Tab. 3.11 : Caractéristiques des fillers calcaires	76
Tab. 3.12 : Composition chimique des fillers calcaires issus du sable 0/4 de Jbel Ressay	76
Tab. 3.13 : Dosage des pâtes normales réalisées et compacités des fillers calcaires	79
Tab. 3.14 : Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42,5 N	80
Tab. 3.15 : Caractéristiques mécanique du CEM I 42.5 N.....	81
Tab. 3.16 : Composition du CEM I 42.5 N	81
Tab. 3.17 : Composition de Bogue du CEM I 42.5 N	81
Tab. 3.18 : Dosage des pâtes réalisés et compacités du CEM I 42.5	83
Tab. 3.19 : Propriétés du superplastifiant utilisé.....	84
Tab. 4.1 : Exemple de calcul de la surface développée du G 10/20 pour le mélange S0A2..	116
Tab. 4.2. : Exemple d'une fiche de formulation du MBE S0A2.....	117
Tab. 4.3 : Composition des mortiers de bétons équivalents, en kg/m^3	117
Tab. 4.4 : Mesure de l'affaissement et de l'étalement des MBE réalisés.....	119
Tab. 4.5 : Classes de consistance des bétons en fonction de l'affaissement, selon NF 18-305 et EN 206-1	132
Tab. 4.6 : Composition des bétons courants, en Kg/m^3	132
Tab. 4.7 : Composition des bétons superplastifiés, en Kg/m^3	133
Tab. 4.8 : Composition des bétons autoplaçants riches en fillers à différents dosages en SP.	134

Tab. 5.1 : Propriétés à l'état frais des bétons courants	139
Tab. 5.2 : Propriétés à l'état frais des bétons superplastifiés	140
Tab. 5.3 : Propriétés à l'état frais des bétons conduisant à des BAP	141
Tab. 5.4 : Propriétés des bétons courants à l'état durcis	151
Tab. 5.5 : Propriétés des bétons superplastifiés à l'état durci	152
Tab. 5.6 : Propriétés des bétons conduisant aux BAP à l'état durci	153

Chapitre 1
INTRODUCTION

1.1 Contexte général de la recherche

La construction des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages d'art exige de gros approvisionnements en matériaux. Jusqu'à présent, les sables les plus couramment utilisés pour la confection des bétons entrant dans ces ouvrages sont les sables roulés alluvionnaires. Mais les prélèvements excessifs de ces sables ont fortement contribué à l'épuisement des ressources et ont provoqué des retombées néfastes sur l'environnement.

De nombreuses régions du monde vivent cette situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats à béton. Les sables de concassage sont très souvent l'unique alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières sont souvent considérés par les utilisateurs comme des « déchets », car ils sont riches en fines, parfois argileuses au demeurant. Ils sont alors quasi-systématiquement écartés pour un usage dans les bétons, bien que les spécifications d'emploi le permettraient dans de nombreux cas.

Plusieurs pays ont déjà été amenés à prendre des mesures de préservation des ressources alluvionnaires en imposant des règles strictes limitant les prélèvements. L'Algérie par exemple a élaboré en 2005 [Loi n° 05-12, 2005] une instruction ministérielle organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux [Instruction, 2007]. Une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable. C'est le cas aussi au Maroc où une loi relative à l'exploitation des carrières a été promulguée en 2002 [Dahir n° 1-02-130, 2002]. Elle vise à valoriser les sables de concassage lavés en tant qu'alternative aux sables alluvionnaires pour la fabrication des bétons hydrauliques [Norme Marocaine 10.1.165, 1995]. Cette loi introduit de nouvelles exigences normatives propres à ce matériau.

En Tunisie, les ressources alluviales sont aussi surexploitées, mais il n'existe pas encore un cadre législatif aussi avancé. De plus, à la différence des exemples précédents, seules des formations carbonatées sont disponibles à proximité des centres de consommation. Ces matériaux présentent généralement les propriétés suffisantes pour fournir des gravillons

de qualité, y compris pour les bétons. Mais les sables de concassage sont mal valorisés, avec pour seules utilisations actuelles la construction routière et les remblais. C'est pourquoi le Ministère de l'Équipement de l'Habitat et de l'Aménagement des Territoires (MEHAT) a lancé une étude visant à la valorisation des sables calcaires en vue de généraliser leur emploi dans les différents domaines de la construction [MEHAT, 2011], en se référant à un manuel technique en cours d'élaboration [Manuel Technique, 2011].

Les présents travaux s'inscrivent dans cette démarche. Ils s'intéressent plus particulièrement à la faisabilité de bétons ordinaires, avec ou sans superplastifiant, fabriqués uniquement à partir de gravillons et de sables de concassage calcaires tunisiens.

Les nombreuses études qui se sont intéressées à la valorisation des matériaux calcaires dans les bétons ont montré généralement le rôle important des fillers, en soulignant que leur présence excessive était souvent un facteur limitant. Toutefois, ces études ont été réalisées le plus souvent sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires [par exemple, Benachour *et al*, 2008 ; Felekoglu, 2007], le but étant de définir la quantité de fillers pouvant être admise dans le sable de concassage, voire se substituer au ciment. La transposition des résultats aux bétons est alors délicate, dans la mesure où le gravillon modifie significativement le comportement du composite. D'autres travaux ont été réalisés directement sur des bétons, à partir de sables de carrière plus ou moins fillérisés de diverses origines [Achour, 2007, Donza *et al*, 2002]. Là aussi, la généralisation des observations faites sur ces mélanges peut poser certaines difficultés, en raison notamment de la variabilité des propriétés des produits.

L'approche adoptée ici est différente. Elle consiste à étudier le comportement rhéologique, mécanique et dimensionnel de bétons tout calcaire contenant les mêmes gravillons et le même sable dont le taux de fillers a été ajusté à 0, 6, 12, 18 et 24% environ. Les matériaux utilisés proviennent de la même carrière et ont été livrés en une seule fois. Les fillers ajoutés ont été extraits directement du sable. Ainsi, en utilisant des gravillons, des sables et des fillers de mêmes caractéristiques minéralogiques, les bétons formulés ne diffèrent que par leur taux de fines. On parvient ainsi à mesurer, en vraie grandeur et sans artéfacts, l'influence réelle du taux de fillers sur le comportement des bétons.

Des bétons ordinaires et des bétons superplastifiés ont été fabriqués avec ces granulats. Par la suite, il est apparu opportun de concevoir aussi des bétons autoplaçants à partir du sable le plus riche en fillers. L'idée est qu'il apporte à la fois la fraction sableuse nécessaire au squelette minéral et une part importante de la fraction fine nécessaire à la stabilisation de la suspension. Cette solution ouvre ainsi une autre voie pour l'utilisation potentielle des sables de concassage dans les bétons, en Tunisie ou ailleurs. Rappelons que les bétons autoplaçants ou BAP sont apparus récemment et qu'ils ont fait l'objet de nombreuses études dans le but d'apprécier les propriétés de ces mélanges en relation avec leur formulation [Tarun *et al*, 2005 ; Bosiljkov, 2003 ; El Hilali, 2009 ; Poppe, de Schutter, 2005]. Ces bétons demandent un volume élevé de fillers (fumées de silice, fillers calcaires, cendres volantes...) pour assurer la stabilité à l'état frais, dépassant généralement les limites normatives des bétons ordinaires.

1.2 Particularité des matériaux calcaires de carrière

Les matériaux de carrières calcaires sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées, par effet de blocage mécanique du système, du moins si leur résistance intrinsèque le permet. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau (efficace) plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

Généralement, les sables de concassage présentent une bonne distribution granulaire, comparativement aux sables de rivières lavés qui manquent souvent de fines. Les classes granulaires de la plage [0,1 - 0,5 mm] présentes dans les sables de concassage sont essentielles à la stabilité du béton frais [De Larrard, 2000].

Comme déjà signalé, les sables calcaires de concassage contiennent généralement des teneurs élevées en fines. Ces fines ont une double action dans le béton [Detwiler et Tennis, 1996]. Au jeune âge, elles ont un effet accélérateur. Les grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les CSH dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment (formation de carboaluminates). A cet égard, des recherches déjà anciennes du CEBTP [Coquillat, Lesage, 1984] ont montré que la pâte de ciment peut réagir avec les grains calcaires et créer une auréole épitaxiale autour

du granulat, à l'origine d'une amélioration progressive de la liaison pâte-granat. [Farran, 1956 ; Farran *et al*, 1972] avait aussi signalé la formation d'une liaison intime entre les granulats calcitiques et la pâte du ciment qui résulterait de plusieurs mécanismes dont un fort accrochage mécanique dû à une surface de contact rugueuse et à une liaison physico-chimique entre les granulats calcaires et la pâte de ciment.

Aujourd'hui, la norme EN 206-1 des bétons hydrauliques admet, dans son application française actuelle [NF EN 206-1, 2004], que les fillers calcaires déclarés actifs puissent être considérés en tant qu'addition à part entière du ciment. Dans ce cas, en présence d'une quantité C de ciment CEM I 42,5 ou 52,5 N ou R, ces fillers peuvent être comptés dans le liant équivalent L en affectant à la quantité A prise en compte un coefficient d'activité k égal à 0,25, soit $L=C+0,25.A$. Le rapport maximum $A/(A+C)$ pouvant être pris en compte dépend de la classe d'exposition du béton. Par exemple, le liant équivalent d'un béton placé dans un environnement sans risque d'attaque ou de corrosion des armatures (X0¹) peut compter jusqu'à 25% de fillers calcaires. En milieu exposé à l'eau de mer (XS1, 2, 3) ou au gel avec sel de déverglaçage (XF4), cette teneur passe à 5%. Elle est nulle pour les bétons soumis à des attaques chimiques (XA1, 2, 3).

Enfin, des travaux plus récents ont montré que dans des bétons tout calcaires, les fillers de même nature que les granulats contribuent à l'amélioration de l'adhérence pâte-granat, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. On observe alors une amélioration des caractéristiques générales des bétons ordinaires [Achour *et al*, 2008].

Les fillers calcaires ont donc une bonne affinité avec la matrice cimentaire. Par ailleurs, ils confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de limiter le ressuage et la ségrégation. Cependant, si leur présence devient excessive, la compacité du béton diminue et la plupart des effets bénéfiques s'estompent, entraînant des effets néfastes sur la rhéologie, la résistance, la durabilité, etc. Il importe donc de vérifier en vraie grandeur le rôle de cette fraction minérale sur les propriétés des bétons, selon sa teneur dans les mélanges.

¹ Classes d'exposition selon EN 206-1

1.3 Intérêts de la recherche

1.3.1 Intérêt général

L'intérêt premier de cette recherche est la valorisation des sables de concassage tunisiens pour la fabrication de bétons tout calcaires, avec ou sans superplastifiant, en tant que ressource alternative aux sables alluvionnaires surexploités. Ainsi, les ressources alluvionnaires encore disponibles pourront être préservées pour les usages les plus nobles (bétons performants par exemple). On propose aussi d'utiliser les sables de concassage pour fabriquer des bétons autoplaçants, l'idée innovante étant que les sables calcaires fillérisés apportent directement la majeure partie des fines nécessaires au mélange. Incidemment, il s'agit également d'améliorer la durabilité des bétons actuels car les sables alluvionnaires utilisés sont généralement pauvres en fines (lavage), conduisant ainsi à des bétons plutôt poreux. Ils contiennent parfois aussi des sels marins pouvant compromettre la pérennité des armatures. Les sables calcaires concassés ne présentent pas cet inconvénient.

1.3.2 Intérêts scientifiques

En premier lieu, cette recherche doit permettre de mesurer en vraie grandeur l'influence du taux de fillers (0, 6, 12, 18 et 24%) sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles de bétons courants, superplastifiés, voire autoplaçants « tout calcaires ». Certains mélanges peuvent alors fournir des formules de bétons optimisés répondant à des exigences requises en termes de maniabilité, de stabilité et de résistance.

En second lieu, la présente étude doit apporter aussi des éléments fiables pour la prise en compte scientifique du rôle des fillers calcaires dans la prédiction des propriétés des bétons. Cette démarche a fait l'objet de nombreux travaux, notamment du LCPC français [De Larrard, 2000]. Il importe donc aussi de s'y référer, afin de confirmer leur pertinence en confrontant les modèles proposés aux données complémentaires obtenues dans le cadre des présents travaux.

1.4 Contenu du mémoire

La première étape de la recherche, objet du chapitre 2, a consisté à réaliser une synthèse bibliographique (état de l'art) des principaux travaux concernant le sujet. Les bétons

concernés sont les bétons courants, avec ou sans superplastifiants, et les bétons autoplacants, confectionnés avec des sables de concassage. L'accent est mis sur les propriétés de ces bétons.

Le chapitre 3 est dédié à l'étude expérimentale. Il comporte tout d'abord un rappel de l'objet de l'étude et le détail du plan expérimental associé. Un inventaire résumant les caractéristiques des différentes ressources tunisiennes aptes à produire des granulats est ensuite donné. Il sert à retenir la carrière la mieux adaptée à notre recherche. Il s'agit de la carrière calcaire de Jbel Ressas située à proximité de Tunis. Le choix des granulats, de la nature du ciment et du superplastifiant est ensuite justifié. La préparation des matériaux est détaillée, en particulier celle des sables qui ont été fabriqués à partir du même échantillon élaboré spécifiquement par le carrier, contenant 16% de fillers environ. Ce sable a été séparé en deux parties, l'une étant conservée telle qu'elle, l'autre étant fractionnée soigneusement par lavage en deux coupures constituées de la fraction fine ($< 80\mu\text{m}$) et de la fraction grenue ($> 80\mu\text{m}$). Des sables ayant respectivement un taux de fillers de 0, 6, 12, 18 et 24% ont pu être ainsi fabriqués par combinaison du sable d'origine avec l'une ou l'autre des fractions lavées (récupérées intégralement). Les caractérisations des différentes propriétés physiques, mécaniques et chimiques des matériaux sont présentées. Des propriétés spécifiques à l'utilisation du logiciel BétonlabPro2 ont été mesurées sur les constituants utilisés. Il s'agit de la compacité des granulats, du ciment et des fillers et le dosage de saturation en superplastifiant du ciment et des fillers.

L'étape avant dernière fait l'objet du chapitre 4 qui est consacré à la formulation des bétons tout calcaires fabriqués à partir de gravillons et des différents sables. Le plan choisi pour l'étude est ainsi présenté. Les bétons sont formulés d'abord sans adjuvant puis en présence d'un superplastifiant. Ils contiennent tous au départ 350 kg de ciment CEM I 42,5 N et des quantités d'eau variables pour atteindre trois affaissements contrastés au cône d'Abrams pour les bétons courants (plastique, fluide et très fluide) et deux affaissements pour les bétons superplastifiés (fluide et très fluide). Les formules de bétons avec les matériaux de carrière doivent être optimisées. Le nombre d'essais sur bétons nécessaire à cet aboutissement est important, d'où l'utilité d'un outil de formulation performant et rapide «BétonlabPro2 », fruit d'une recherche de près de quinze ans au laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (LCPC). Il a été validé sur un grand nombre de bétons à base de matériaux traditionnels. Il est

basé sur un modèle de calcul de compacité granulaire dénommé « Modèle d'Empilement Compressible ou MEC » et met en relation la plupart des propriétés des bétons avec la structure granulaire de la formule. L'utilisation du logiciel BétonlabPro2 permet de simuler des gâchées et de prévoir leurs différentes propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Il permet alors de réduire considérablement le nombre de test sur bétons, mais il faut toujours vérifier les propriétés obtenues par des essais. Ainsi, le chapitre 4 présente les modèles associés au logiciel et définit les étapes suivies pour les simulations des différents bétons. Une autre méthode de formulation a été aussi adoptée. Il s'agit de l'approche de Dreux-Gorisse qui a servi à la comparaison des courbes granulaires des mélanges obtenues par les deux méthodes de formulation. La méthode MBE (Micro Béton Equivalent) a aussi été appliquée. Le but, le principe, la méthode de calcul de la composition d'un MBE et les étapes de fabrication ont été présentés. Ces MBE ont été fabriqués pour les mélanges fluides, au départ, sans superplastifiant, puis, avec des doses croissantes de superplastifiant. Ce chapitre présente également les étapes de préparation des matériaux avant chaque gâchée, le calcul des formules de bétons et les fiches expérimentales des mélanges formulés. Les étapes suivies pour la réalisation des différentes gâchées ont été expliquées en donnant la composition de chaque série de béton.

La dernière étape fait l'objet du chapitre 5 qui est consacré à l'étude des propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles des bétons réalisés. Notons que les variations dimensionnelles ont été suivies uniquement pour les mélanges fluides réalisés avec et sans superplastifiant. Pour ceci, des éprouvettes supplémentaires (diamètre 71 mm et longueur 640 mm) ont été coulées et les mesures ont été suivies pendant 1 an. Les propriétés mesurées sont ensuite confrontées aux prévisions du modèle. Dans notre cas, l'adaptabilité de l'outil BTLP2 aux matériaux riches en fines a été testée et vérifiée.

Enfin, le chapitre 6 présente des conclusions de tous les travaux réalisés et les perspectives.

Chapitre 2
ÉTAT DE L'ART

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des principaux travaux concernant les travaux généraux et les travaux tunisiens s'intéressant à la valorisation des sables de concassage et des fillers calcaires dans les mortiers, les bétons courants avec ou sans superplastifiants, les bétons autoplacants et les bétons à hautes performances.

Ce chapitre présente également les bétons ordinaires et leurs constituants, les bétons autoplacants et leurs propriétés à l'état frais et durci ainsi que leurs conditions de réalisation.

2.2 Travaux généraux

2.2.1 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les mortiers et les bétons courants

Depuis les années mille neuf cent quatre vingt, les possibilités d'emploi des granulats calcaires dans la confection des bétons ont été étudiés. Certaines études françaises [Coquillat *et al*, 1984] ont tout d'abord montré que les calcaires de dureté moyenne à faible permettent de confectionner des bétons de caractéristiques très satisfaisantes, comparables à celles de bétons de granulats silico-calcaires ou siliceux. Mais ces bétons nécessitent souvent plus d'eau, notamment lorsque la teneur en éléments fins augmente, entraînant alors une baisse de résistance mécanique. Toutefois, au jeune âge (< 48 heures), les résistances des bétons calcaires sont généralement supérieures à celles des bétons silico-calcaires ou siliceux. Les écarts de résistance trouvés semblent plus liés à la nature et au dosage en ciment qu'à la résistance propre des granulats [Coquillat *et al*, 1984]. Pour les mélanges granulaires pauvres en fines, une teneur minimale en ciment de 330 kg/m³ est recommandée [Bertrandi, Coquillat, 1992]. D'autres études [Buil, Paillere, 1984] ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle « actif » exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment. Des essais réalisés sur mortier [Cimili, 1984] ont montré que, pour une porosité constante donnée, le mortier calcaire est toujours plus résistant que le mortier siliceux.

D'autres recherches ont été réalisées sur des bétons calcaires par Bachiorrini et Murat [Bachiorrini, Murat, 1987]. Elles ont montré que de très bons bétons hydrauliques pouvaient être obtenus avec des gravillons et des sables calcaires durs concassés ou broyés et renfermant

15 à 20 % de fines. Les calcaires durs peuvent ainsi être utilisés comme granulats pour bétons performants ou exposés à des conditions sévères. Ces bétons présentent d'excellentes propriétés physiques synonymes de durabilité (compacité, perméabilité) et des résistances mécaniques généralement supérieures à celles des bétons de granulats alluvionnaires confectionnés avec des sables lavés peu ou pas fillérisés. La fillérisation des sables calcaires améliore donc sensiblement les performances mécaniques des bétons, sans avoir par ailleurs d'effets sensibles sur le retrait et la durabilité. Ces travaux comportent aussi une étude sur mortiers. Les résultats ont montré que les mortiers avec sables calcaires desquels toutes les fines sont extraites sont ceux qui donnent les performances mécaniques les plus médiocres. L'introduction des fines dans le sable améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques de tous les mélanges étudiés [Bachiorrini, Murat, 1987]. Les courbes de résistances en fonction de la teneur en fines ont alors une allure en cloche aplatie avec un optimum qui se situe sensiblement à 12% de fines dans le sable. A 15% et à consistance de mortier constante, le retrait hydraulique augmente. Mais le facteur qui influe le plus sur ce terme est la propreté des fines, jugée par la valeur de bleu. Les autres facteurs déterminants de la durabilité sont la quantité d'air occlus ainsi que la nature et le dosage en ciment. Le caractère « actif » des fillers calcaires a été quantifié en leur affectant un coefficient apparent « d'activité liante » k , à partir de la loi de Bolomey et en considérant non pas le rapport C/E mais le rapport généralisé $(C + kF)/E$, avec F la quantité de fillers calcaires en kg par m³. Les coefficients k obtenus aux diverses échéances sur les mortiers s'échelonnent entre 0,25 et 0,45 avec les valeurs les plus fréquentes situées aux alentours de 0,30. Les fillers calcaires ont donc bien une activité liante. Par ailleurs, l'analyse du couple liant-grulats a montré notamment des phénomènes particuliers dans la zone de transition entre pâte de ciment Portland et grains calcaires (néoformations hydratées). Les auteurs considèrent alors que les fillers calcaires ont pour principales actions :

- l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire ;
- une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés, c'est-à-dire un effet réellement hydraulique ;
- des réactions physico-chimiques avec la calcite et les aluminates du ciment donnant lieu à des néoformations hydratées.

Ces travaux ont apporté une meilleure connaissance du rôle des fines dans les sables calcaires. Les expériences réalisées à la suite sur des grands chantiers ainsi que les travaux de

l'industrie cimentière sur les ciments avec fillers ont permis le développement d'un nouveau constituant des bétons hydrauliques ; les additions de fillers calcaires.

En effet, d'autres travaux ont montré que l'utilisation d'un filler inerte est théoriquement avantageuse dans les bétons maigres, car sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides intergranulaires [de Larrard, 2000]. Les fillers calcaires n'étant pas inertes, leur utilisation est encore plus bénéfique si le ciment contient un taux élevé de C_3A . L'effet accélérateur est contrôlé par la surface spécifique du produit. Plus il est fin, plus cet effet est important. Un filler calcaire très fin demande cependant plus d'eau. Il n'a donc d'intérêt que si une plus grande quantité de superplastifiant est utilisée, car les fillers calcaires consomment du superplastifiant, au même titre que le ciment. Comme son utilisation ne permet qu'une faible réduction de la quantité de ciment, il y a donc un équilibre économique à trouver. Pour les bétons à haute résistance, les fillers calcaires deviennent réellement intéressant grâce à l'emploi d'un superplastifiant [de Larrard, 2000]. La quantité optimale de filler calcaire augmente quand la dose de superplastifiant augmente et quand la résistance visée diminue. L'utilisation des fillers entraîne aussi une légère augmentation du retrait total [de Larrard, 2000]. Mais elle n'influe pas sur la durabilité générale du matériau (à maniabilité et résistance égales) si les fillers ne sont pas surdosés [Detwiler *et* Tennis, 1996], sauf pour la résistance à l'écaillage [Caré *et al.*, 1998].

Des études réalisées en Turquie [Çelik *et* Marar, 1996] se sont intéressées aux problèmes des poussières provenant du concassage des roches calcaires et à la possibilité de leur utilisation dans les bétons en tant qu'addition. Elles ont consisté à étudier l'influence du taux de poussières de concassage sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons, à l'état frais et durci. Le sable a été partiellement remplacé par 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de poussières. Il a été constaté que lorsque le taux de poussières augmente, le volume d'air et l'affaissement diminuent. Un ajout de poussières de concassage jusqu'à 15% contribue à la diminution de l'absorption des bétons [Buil, Paillere, 1984]. Par contre, au delà de 15 % l'absorption augmente. Les performances mécaniques des bétons réalisés sont représentées par la Fig. 2.1.

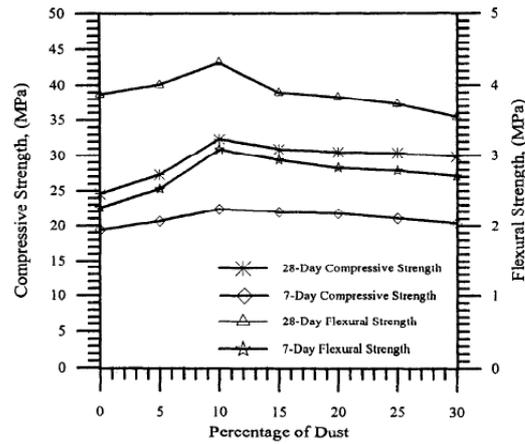


Fig. 2.1 : Performances mécaniques des bétons à différents taux de poussières (Çelik, Marar, 1996)

Les mélanges les plus performants sont ceux qui contiennent 10 % de poussières. Au-delà, les performances mécaniques diminuent progressivement. Les mélanges contenant 5 % de poussières n'ont pas assez de fillers pour augmenter la compacité de la pâte de ciment, et ils présentent une résistance inférieure à ceux obtenus avec 10% d'ajout. Pour les mélanges ayant plus de 10%, les auteurs supposent qu'il n'y a pas assez de pâte de ciment pour enrober les granulats, ce qui entraîne une diminution de la résistance [Çelik *et* Marar, 1996].

Le retrait de séchage de ces bétons est présenté Fig.2.2. Il augmente pour des taux de poussières allant de 0 à 10 % ; il diminue ensuite pour les taux supérieurs ou égaux à 10%. Les bétons les plus résistants sont les mélanges les plus compacts, les moins poreux et qui s'opposent le plus à la pénétration de l'eau. Cependant, ce sont les mélanges qui ont enregistré le retrait le plus élevé [Çelik *et* Marar, 1996].

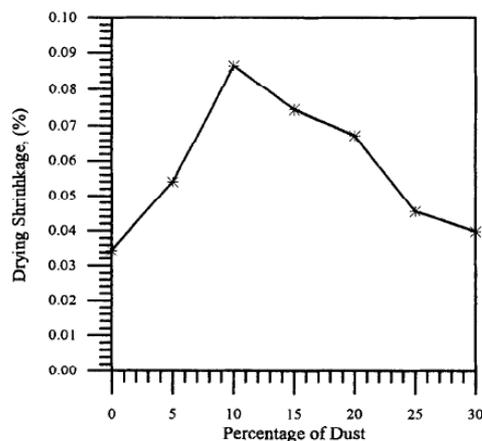


Fig. 2.2 : Retrait de séchage en fonction du taux de poussières ajoutées (Çelik. *et* Marar, 1996)

En Algérie, la demande croissante en granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières, suivi d'une exploitation anarchique des sables de mer. Par ailleurs, 20 % de sables fabriqués en carrières ne sont pas utilisés pour la construction à cause de leur teneur en fines supérieure à 12 % (limite normative actuelle [Sadhouari *et al*, 2009]), et les fillers résultants du processus de concassage sont considérés comme des résidus inexploitable. Pour limiter l'utilisation des sables de mer et dans le but de valoriser les matériaux locaux, une étude [Sadhouari *et al*, 2009] a été réalisée avec deux sables de concassage provenant de deux gisements différents (sable de Kristel noté SC_K et sable de Sidi Ali Benyoub noté SC_S). Des sables mélanges ont été fabriqués en combinant 60% des sables de concassage avec 40% du sable de mer (provenant de Terga). Les résultats observés sur mortiers ont montré que les résistances obtenues avec les sables de concassage seuls n'atteignent que 75 à 90 % des résistances obtenues avec les sables combinés. De plus, la montée en résistance des mortiers combinés est plus rapide que celle des mortiers à base de sable de concassage seul [Sadhouari *et al*, 2009]. La résistance à la compression est très influencée par la variation de teneur en fines. Pour contribuer à la valorisation des sables de concassage dans les bétons, trois bétons ont été formulés avec les sables de concassage (SC_K et SC_S) et le sable de mer (Sm_T). Ces bétons sont référenciés respectivement BG_K , BG_S et BT . Les bétons réalisés avec les sables de concassage ont été formulés avec différentes teneurs en fines, de l'ordre de 0, 5, 10, 15 et 20 %. Les résultats obtenus à l'état frais (Fig.2.3) ont montré que le pourcentage d'air occlus en fonction du pourcentage de fines passe par un minimum situé entre 10% et 15% pour les deux séries des bétons. Corrélativement, la densité réelle du béton augmente rapidement lorsque le taux de fines passe de 0 à 15%. Au delà, elle diminue pour les deux séries de bétons. Les fines calcaires ont donc une influence positive, puis négative sur la densité, selon la quantité présente dans les mélanges. D'autre part, les fines confèrent au béton frais une certaine cohésion et un pouvoir de rétention d'eau qui permet le maintien de l'homogénéité, en s'opposant au ressuage et à la ségrégation.

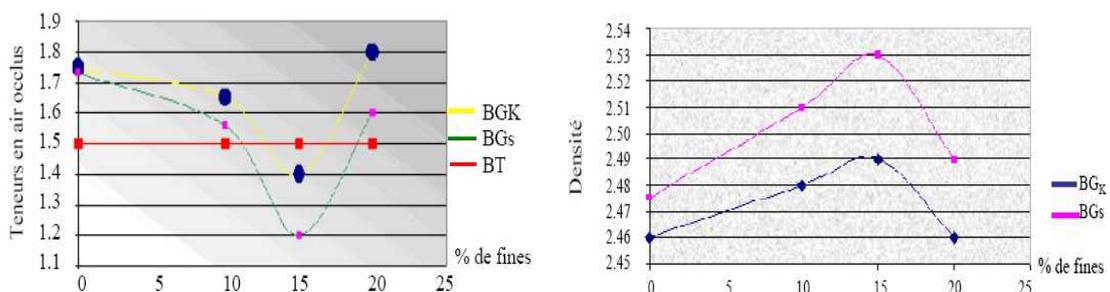


Fig. 2.3 : Teneur en air et densité des bétons frais à différents taux de fillers (Sadhouari *et al*, 2009)

A l'état durci, les courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de fines présentent la même allure, quel que soit l'âge des différents types de bétons, comme le montre la Fig. 2.4. A toutes les échéances, la résistance augmente avec le taux de fillers pour atteindre un maximum vers 15% de fines [Sadhouari *et al*, 2009], puis chute modérément ensuite. En conclusion, les auteurs considèrent que le sable de concassage est une solution intéressante, à condition que sa teneur en fines soit optimale ou bien qu'il soit combiné avec un sable de mer.

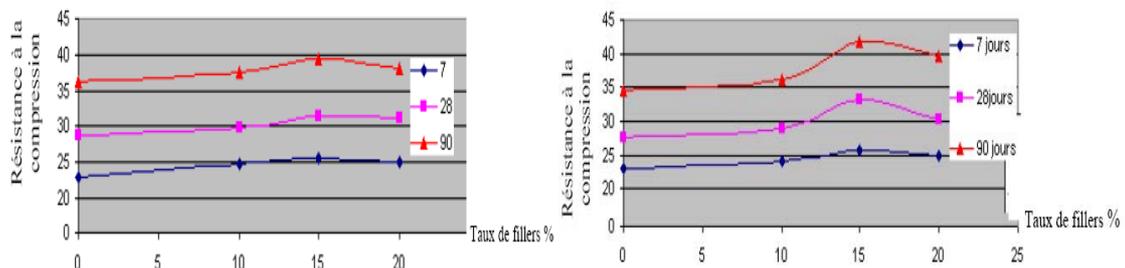


Fig. 2.4 : Résistance à la compression des mélanges à différents taux de fillers (Sadhouari *et al*, 2009). À gauche le mélange BGK et à droite le mélange BGS

D'autres recherches se sont intéressées à un critère optimal d'utilisation des fines calcaires dans les mélanges cimentaires algériens [Guemmadi *et al.*, 2008]. En général, il a été confirmé qu'un ajout de 5% de fillers calcaires dans le ciment (clinker) n'affecte pas sa résistance mécanique [Hawkins *et al.*, 2003]. Ce thème a fait l'objet de plusieurs recherches car il présente des avantages techniques, économiques et écologiques intéressants. En effet, il permet à la fois d'augmenter la résistance à la compression au jeune âge [Moir, Kelham, 1997], de produire un ciment au coût de production à la tonne moins élevé, dont les émissions de CO₂ et de NO₂ sont réduites [Baron, Douvre, 1987].

La substitution du ciment Portland par des fillers calcaires a été étudiée sur des pâtes de ciment à l'état frais et durci [Guemmadi *et al.*, 2008]. Quatre fillers de finesses variables ont remplacé le ciment avec les pourcentages suivants : 0, 5, 10, 15, 20, 30 et 40%. Les résultats ont révélés que la substitution du ciment portland par les fillers calcaires les plus fins, à un taux de 15%, réduit légèrement la consistance des pâtes (voir Fig.2.5) ainsi que le temps de prise. Les fillers jouent ici le rôle de « superplastifiant ». Par ailleurs, la substitution du ciment par les fillers calcaires diminue la porosité totale et améliore la résistance à la compression, notamment si les fines ont une surface spécifique élevée et si la substitution est de l'ordre de 15%, comme le montre la Fig.2.6. L'accélération de l'hydratation de C₃A et

C_3S , la formation des carboaluminates, la nature de la zone de transition entre fillers et pâte de ciment sont des facteurs qui sont conditionnés par la finesse des fillers.

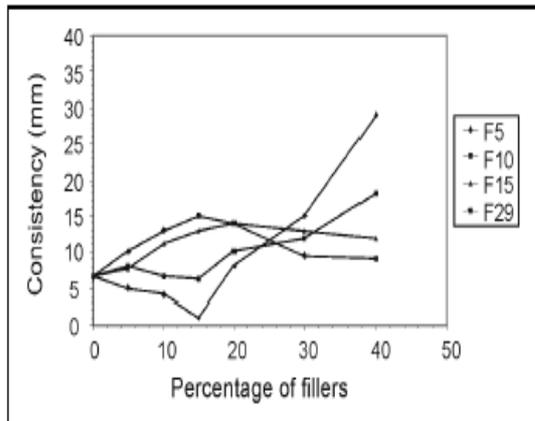


Fig. 2.5 : Consistance des pâtes de ciment en fonction du pourcentage de substitution (Guemmadi *et al*, 2008)

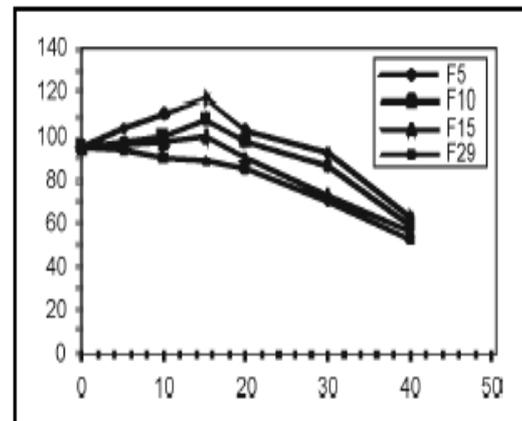


Fig. 2.6 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression des pâtes de ciment (Guemmadi *et al*, 2008)

Vingt mélanges ayant différents taux de fines (0, 6, 12, 18 et 24%) ont aussi été confectionnés avec deux types de sable A et K et pour deux courbes granulaires de mélanges : l'une continue et l'autre discontinue [Guemmadi *et al*, 2008]. Les mélanges formulés sont désignés par AC et KC s'il s'agit d'une courbe granulaire continue et par AD et KD si la courbe granulaire du mélange est discontinue. Il a été remarqué que les éléments fins ont une influence importante sur le rapport E/C. Plus le taux de fillers est important, plus la demande en eau nécessaire à l'obtention du même affaissement est importante (Fig. 2.7). Au-delà d'un taux de fillers de 18 % approximativement, la demande en eau devient moins importante. Les auteurs font l'hypothèse ici que la surface spécifique élevée des fillers conduit à former une microstructure colloïdale qui retient l'eau... Ces observations sont valables pour les deux squelettes granulaires étudiés, continu et discontinu, indépendamment de la nature minéralogique du sable utilisé [Guemmadi *et al*, 2008]. Approximativement, pour un taux de fillers de 18%, les fillers se comportent comme un fluidifiant. Selon Bertrand et Coquillat [Bertrand, Coquillat, 1992] pour une consistance plastique, le taux de fillers optimal semble se situer entre 8 et 12 % dans le sable. Ainsi, il est nécessaire de considérer un nouveau paramètre faisant intervenir les effets de l'activité colloïdale des fillers. Les auteurs concluent que :

- pour un coefficient d'activité élevé, la meilleure maniabilité est atteinte [Voglis *et al*, 2005] pour un taux de fillers de 8 %.

- la demande en eau devient considérable pour le coefficient d'activité le plus élevé.

Les auteurs affirment que le coefficient d'activité est égal à 0,5 dans le cas présent, ce qui explique qu'ils sont allés jusqu'à 18 % pour atteindre l'optimum.

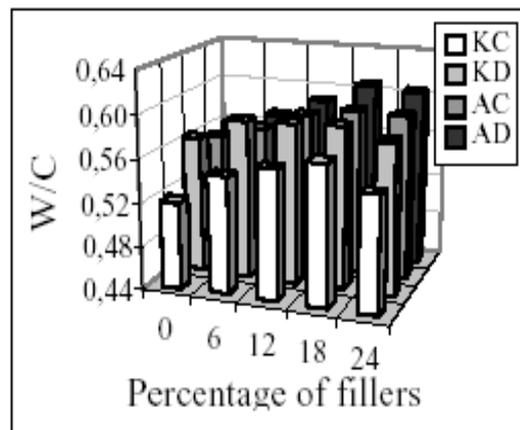


Fig. 2.7 : Variation du rapport eau/ciment en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi *et al*, 2008)

Entre 0 et 12%, la densité augmente rapidement en fonction du taux de fillers. Le maximum de densité est observé entre 15 et 18 % (Fig. 2.8). Au-delà, une diminution est observée pour tous les mélanges. Ainsi, les fillers ont une influence tantôt positive, tantôt négative sur la densité. L'influence des fillers est plus marquée pour les bétons discontinus. A l'opposée de la densité, le pourcentage d'air diminue avec l'ajout de fillers, l'optimum est observé aux environs de 18% (Fig. 2.9). Pour les valeurs comprises entre 0 et 12%, les courbes sont presque constantes [Guemmadi *et al*, 2008].

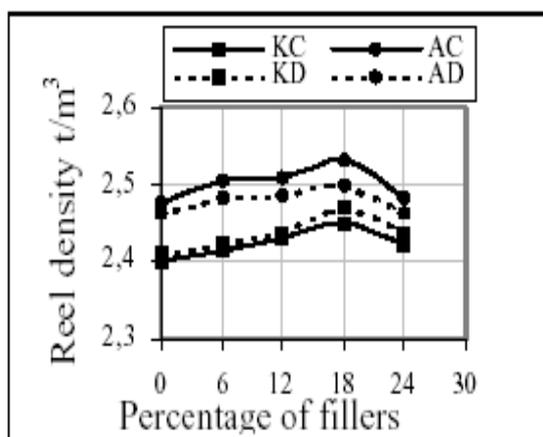


Fig. 2.8 : Variation de la densité réelle en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi *et al*, 2008)

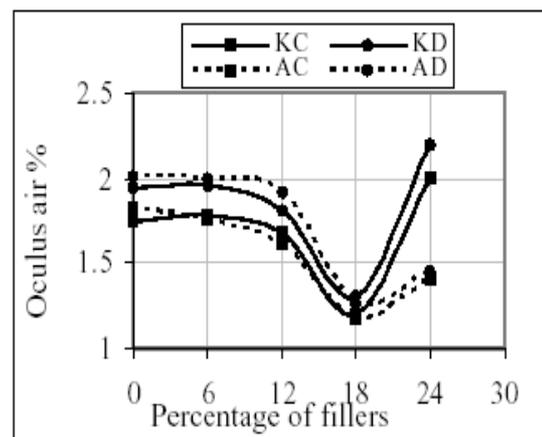


Fig. 2.9 : Variation de l'air en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi *et al*, 2008)

La résistance à la compression de tous les mélanges augmente avec le temps, comme le montre la Fig. 2. 10, selon une cinétique qui semble indépendante du taux de fillers ou du type de béton.

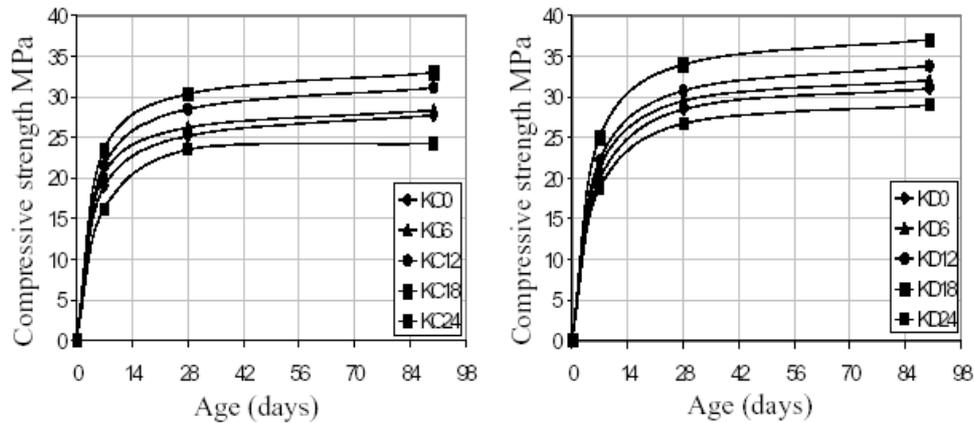


Fig. 2.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fillers (Guemmadi *et al*, 2008)

D'après ces résultats, les auteurs parviennent à la conclusion que les fines calcaires jouent les rôles suivants :

- rôle de remplissage en comblant le manque d'éléments fins dans le ciment
- rôle rhéologique en dispersant les grains de ciment diminuant ainsi la demande en eau
- rôle chimique et physique par la formation des carboaluminates.

En Belgique, les fillers calcaires ont été longtemps considérés comme inertes au sens des normes « béton » [Courard *et al*, 2008]. Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'une certaine activité « liante » pouvait leur être attribuée. Par exemple, une étude a été menée au Sud de la Belgique afin d'évaluer l'effet de l'application du coefficient k à différents fillers calcaires de production locale. Six fillers ont été sélectionnés pour évaluer leurs effets sur les propriétés de mortiers et de bétons [Courard *et al*, 2008]. Le concept du coefficient k, tel que défini dans la norme européenne EN 206-1 pour les additions à caractère hydraulique et pouzzolanique, a été utilisé pour formuler les bétons. La composition du béton de référence sans fillers a été choisie pour satisfaire les exigences de durabilité pour une application en Belgique, dans un environnement extérieur (gel et contact avec la pluie).

Les résultats de cette recherche intégrant des aspects de durabilité à long terme ont montré que, malgré la diminution de la teneur en ciment et l'augmentation du rapport eau/ciment des bétons additionnés de fillers calcaires, des propriétés équivalentes sont

obtenues en termes de résistance à la compression, d'absorption d'eau par immersion, de retrait de séchage et de résistance à la carbonatation. Par contre, l'absorption d'eau capillaire est systématiquement augmentée et un gonflement important est observé avec certains fillers en cas d'immersion dans une solution à haute teneur en sulfates. Les résultats indiquent également que la contamination des fillers par des particules argileuses contribue à augmenter la demande en eau des bétons [Courard *et al*, 2008].

Ces dernières années, la plupart des bétons sont formulés en adoptant un rapport e/c inférieur à 0,45, voire même parfois inférieur à 0,35. Les modèles de résistances impliquent que pour ces bétons, une fraction de ciment se comporte comme un filler inerte puisqu'il n'y a pas assez d'eau pour assurer une hydratation complète. C'est dans ces bétons que le remplacement partiel du ciment par un fillers moins cher et plus respectueux de l'environnement, comme un fillers calcaire par exemple, est le plus intéressant. Une étude a analysé la porosité capillaire totale des pâtes de ciment contenant différents taux de fillers calcaires [Dale *et al*, 2009], afin de trouver le pourcentage optimum de remplacement partiel du ciment par ces fillers. La finesse des fillers calcaires a été aussi prise en compte en utilisant des fillers de tailles médianes différentes. Les résultats obtenus ont montré que le remplacement partiel du ciment par des fillers calcaires, jusqu'à 15 % en masse, pour des bétons ayant un rapport e/c égal à 0,3 et qui présentent une hydratation maximale dans des conditions saturées, est tout a fait possible sans affecter la porosité capillaire et les propriétés à long terme. Les bétons à faible rapport e/c présentent toutefois des déformations significatives dues à la fissuration au jeune âge.

A l'inverse, sur mortiers, la finesse des fillers limite plus ou moins les déformations, selon leur finesse. La Fig. 2.11 présente les déformations d'un mortier témoin et de deux mortiers à 10% de fillers fins ou grenus, ayant même rapport e/c et des résistances à la compression comparables. On constate que l'utilisation d'un filler moins fin est très avantageuse [Dale *et al*, 2009].

Quand les fillers sont fins, la distance entre les grains de la pâte de ciment à l'état frais sont réduites, ce qui augmente la tension capillaire et provoque des retraites plus amples (Fig. 2.11). Quand les fillers sont plus grossiers et de granularité comparable à celle du ciment, la compacité de la pâte est plus faible. La tension capillaire est alors moindre ainsi que le retrait (Fig. 2.11) [Dale *et al*, 2009].

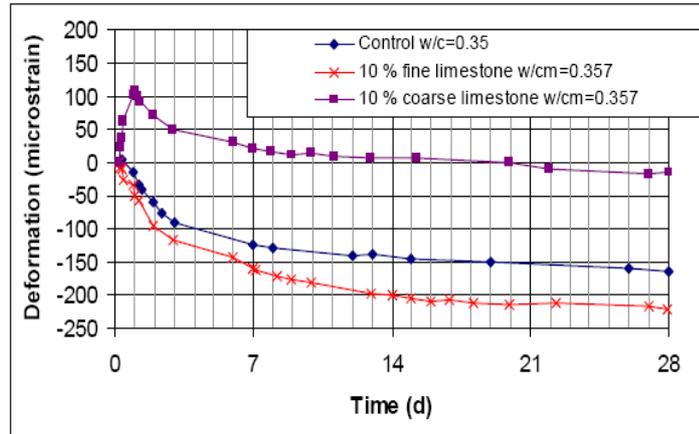


Fig. 2.11 : Déformation des mortiers sans fillers ou avec remplacement partiel de 10 % de ciment par des fillers calcaires en masse. (Bentz *et al*, 2008).

D'autres résultats, présentés Fig. 2.12, illustrent aussi le retrait des mortiers confectionnés avec un rapport e/c égal à 0,3 et un ciment substitué par 10 % de fillers calcaires en masse. Ils ont été obtenus en utilisant trois fillers de finesses différentes ayant un diamètre moyen de particules compris entre 3 et 100 μm . Le filler intermédiaire est de même finesse que le ciment avec un diamètre moyen de 17 μm [Dale *et al*, 2009]. Les courbes confirment le potentiel de réduction du retrait au jeune âge des fillers grossiers [Bucher, 2009].

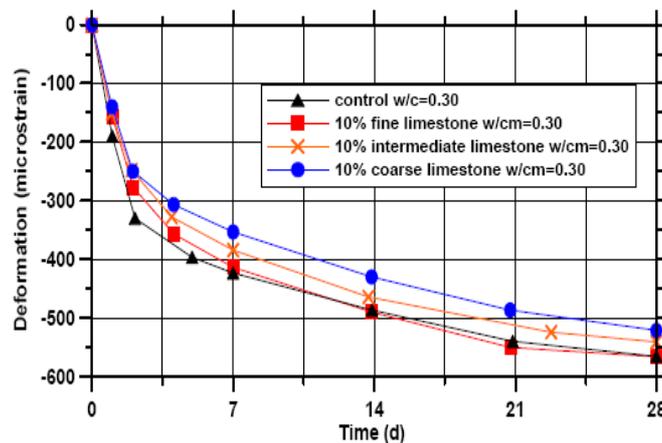


Fig. 2.12 : Déformation des mortiers remplacés par 10 % en masse de fillers calcaires, et du mortier de contrôle (sans fillers) (Bucher, 2009).

Ces analyses montrent que pour les bétons à faible rapport e/c, le ciment peut être remplacé partiellement par des fillers calcaires à des pourcentages supérieurs à la valeur

courante de 5 % déclarée par exemple dans la spécification de l'ASTM C150. Les diminutions de résistance à la compression observées expérimentalement dans ces essais sont de l'ordre de 7 % pour un remplacement de 10 % et de l'ordre de 12 % pour 20 % de remplacement. Ces pertes peuvent être contrôlées par une légère réduction du rapport e/c. Le remplacement partiel du ciment par des fillers calcaires dans des bétons à faible rapport e/c semble donc être très intéressant. Mais, dans les faits, cette possibilité n'est pas encore exploitée [Dale *et al*, 2009].

En conclusion, on retiendra que ces recherches sont encourageantes pour l'utilisation des sables de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des bétons hydrauliques.

2.2.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants

L'incorporation partielle ou totale du sable de concassage dans la composition des Bétons AutoPlaçants ou BAP donne des caractéristiques rhéologiques acceptables lorsque la composition est adaptée. Une teneur élevée en fillers est nécessaire pour éliminer les frottements inter granulaires et des dosages en eau et en superplastifiant modérés sont conseillés pour éviter les ségrégations et les blocages de l'écoulement [Ouchi, 1999 ; Bosiljkov, 2003].

Une étude réalisée en Turquie a été dédiée à l'utilisation des volumes importants de déchets de carrières calcaires dans l'industrie du béton, notamment les fillers [Felekoglu, 2007]. Ceux-ci sont nuisibles à l'environnement et doivent être traités par des systèmes de filtration adaptés (Fig. 2.13).

En béton ordinaire, l'utilisation de ces fillers est limitée car ils augmentent la demande en eau et réduisent concomitamment la résistance. Par contre, dans les BAP, ces fillers peuvent être introduits en masse puisque la fluidité est maintenue en utilisant un superplastifiant. Il existe alors deux voies pour conserver la stabilité et la fluidité des BAP. La première consiste à augmenter la viscosité du béton frais en augmentant le volume de pâte, c'est-à-dire le dosage en ciment et/ou en additions minérales comme les cendres volantes par exemple. Mais ceci peut provoquer une plus grande chaleur d'hydratation et un retrait accru lors du séchage. Toutefois, les fillers calcaires n'ont pas ces inconvénients. La deuxième voie

repose sur l'emploi d'un agent de viscosité. Mais les produits disponibles coûtent assez cher, et ils génèrent souvent un volume important d'air entraîné.



Fig. 2.13 : Système de filtration des déchets de carrières (marquage circulaire) et récupération sous forme de poudres (marquage rectangulaire) (Felekoglu, 2007).

Les travaux déjà réalisés ont montré que l'utilisation des fillers calcaires :

- augmente significativement la maniabilité des mortiers et des BAP [(Sahmaran *et al*, 2006)]
- réduit le dosage en superplastifiant tout en maintenant une fluidité constante [Sonebi *et al*, 2004]
- présente plusieurs avantages, dont ceux de réduire le coût des BAP et d'utiliser des matériaux qui posent des problèmes de stockage et d'environnement [Bosiljkov, 2003].

Pour montrer l'intérêt de l'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du béton (dont celle des BAP) [Felekoglu, 2007], dix pâtes de ciment ont été formulées, les unes contenant des fillers calcaires issus des systèmes de filtration des carrières (QLP), les autres contenant des fillers calcaires traités (PLP). Les différents mélanges ont été réalisés en substituant le ciment par 10, 20, 30 et 40 % de fillers calcaires, de l'un ou de l'autre type. Deux pâtes pures de ciment, sans et avec superplastifiant, ont servi de référence. Les résultats ont montré que les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/(ciment+fillers) constants. Pour la résistance à la compression (Fig. 2.14), les fillers

calcaires n'ont pas tous la même efficacité. L'amélioration la plus grande est obtenue avec 10% de fillers issus des filtres de carrières (QLP). Au-delà de cette valeur, la résistance diminue.

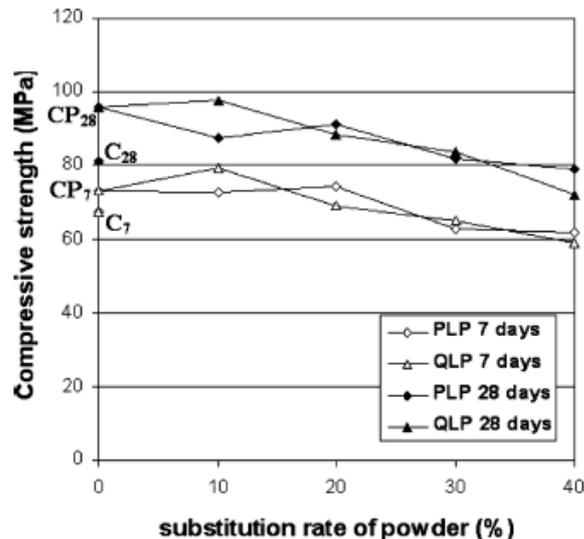


Fig. 2.14 : Résistance à la compression des pâtes de ciments (Felekoglu, 2007)

Des BAP contenant ces deux types de fillers ont été formulés [Felekoglu, 2007], et leurs performances ont été comparées à celles d'un mélange de contrôle sans addition. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- pour les BAP de classe de résistance courante (30 MPa) contenant 300 à 310 kg de ciment, les fillers issus des systèmes de filtration de carrières peuvent être utilisés,
- pour des classes plus élevées (45 à 50 MPa), ces fillers peuvent aussi être utilisés mais il faut aussi augmenter le dosage de ciment sous peine d'une diminution de la résistance,
- le coût des BAP contenant ces fillers est réduit de 0,05 à 0,1 \$/MPa/m³ par rapport au coût d'un BAP ne contenant que du ciment, ce qui donne, pour une résistance moyenne de 30 MPa, une réduction de l'ordre de 1,5 à 3 \$/m³

Ainsi, l'utilisation des fillers calcaires obtenus par les systèmes de filtration des carrières dans les bétons autoplaçants présente une solution économique et environnementale intéressante [Felekoglu, 2007].

Une autre étude comparant l'utilisation d'un sable riche et d'un sable pauvre en fines dans les bétons autoplaçants a été menée en Turquie [Felekoglu, 2006]. Un sable naturel lavé,

un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés pauvres en fines, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci. Ces travaux ont permis de conclure que :

- pour remplacer les fines contenues dans les BAP, des sables concassés riches en fines (15 à 20 % en masse) peuvent être utilisés. Le choix du type de sable apparaît donc important pour obtenir une bonne résistance à la compression avec un minimum d'addition,
- l'utilisation d'un sable calcaire de concassage a été bien appréciée par les praticiens,
- l'essai au bleu de méthylène est une méthode efficace pour choisir un sable approprié ayant un pourcentage élevé en fines, à défaut de méthodes plus sophistiquées comme la microscopie SEM.

La possibilité d'utiliser les calcaires de carrières en vue de développer des BAP économiques a été aussi étudiée au Canada [Tarun *et al*, 2005]. Dans une première étape, le remplacement partiel du ciment par un taux croissant de cendres volantes de 0, 20, 35, 45 et 55% a été étudié. Le mélange à 35% de cendres volantes a été choisi comme mélange de référence puisqu'il améliore la résistance, diminue le coût des matériaux et diminue aussi le dosage en agent de viscosité. La deuxième partie est consacrée à la confection de bétons composés par le mélange de référence avec 0, 10, 20, 30, 40, 50% de fillers calcaires provenant des carrières (en remplacement du sable naturel). Les résultats obtenus ont montré que :

- le remplacement partiel du sable par 50% en masse des fines de carrière diminue le coût des BAP sans affecter la résistance à la compression (voir Fig. 2.15)
- une diminution du dosage du réducteur d'eau a été observée
- la résistance à la compression diminue à jeune âge mais elle augmente à long termes

Le remplacement partiel du sable par des fines calcaires et du ciment par des cendres volantes réduit donc largement le coût des BAP et donne des résistances à 28j et à long termes comparables à celles des BHP.

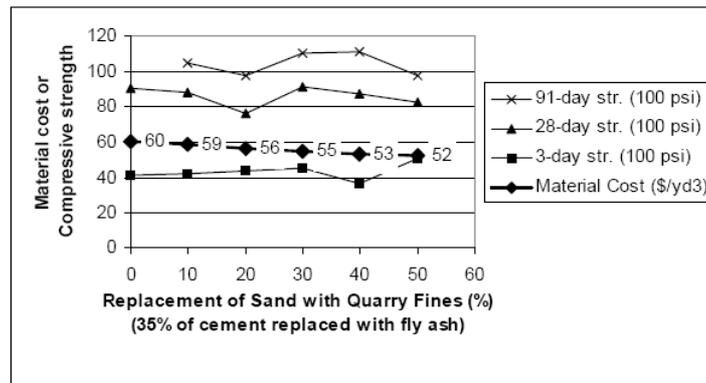


Fig. 2.15 : Résistance à la compression des BAP, le sable est remplacé partiellement par les fillers de carrières (Tarun *et al*, 2005)

Les fillers non pouzzolaniques sont fréquemment utilisés pour optimiser la compacité des particules et le comportement des pâtes de ciment dans les bétons autoplaçants. Il a été démontré [Bosilijkov, 2003] que les fillers calcaires provenant du concassage des granulats ont une influence positive sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Pour les BAP ayant un dosage en ciment de l'ordre de 380 et 390 kg/m³, une substitution jusqu'à 50% du volume de ciment par des fillers calcaires provenant du concassage des granulats peut être utilisées. Les résultats montrent que si les fillers calcaires sont bien gradués, ils augmentent significativement la déformabilité de la pâte. Quand un grand volume de fillers est ajouté aux BAP, leur résistance à la compression à 28 jours est améliorée. Ces fillers permettent de diminuer le coût des BAP.

Il a été démontré aussi que l'ajout de fillers calcaires de surface spécifique Blaine élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné, augmente leur compacité, améliore leur résistance à la ségrégation et la robustesse de leur formulation [El Hilali, 2009]. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe significativement sur la demande en superplastifiant (SP). Une augmentation de la surface Blaine des fillers conduirait (étonnement) à une diminution du dosage en SP et à une diminution de l'ouvrabilité au cours du temps [El Hilali, 2009].

Comme précédemment, ces différentes recherches contribuent à valoriser l'utilisation des fillers calcaires et des sables de concassage dans les BAP.

2.2.3 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons à hautes performances

Dans les travaux de Donza, Cabrera et Irassar [Donza *et al*, 2002], les performances de bétons formulés avec un sable de concassage ont été comparées à celles obtenues avec un sable naturel. Les deux types de bétons ont été formulés avec le même dosage en ciment, le même rapport e/c et la même maniabilité a été visée en modulant le dosage en superplastifiant. Les résultats obtenus ont montré que les bétons avec sables de concassage nécessitent un dosage plus élevé en superplastifiant que les bétons aux sables naturels. Ils présentent en revanche des résistances mécaniques supérieures à celles obtenues avec le sable naturel, à tout âge d'essais.

Les sables concassés peuvent donc être utilisés pour obtenir des bétons à hautes performances (BHP) ayant des propriétés mécaniques similaires ou meilleures à celles obtenues avec un sable naturel de bonnes caractéristiques.

D'autres recherches réalisées sur des mortiers confectionnés avec des sables remplacés partiellement par un pourcentage croissant de poussières de concassages, allant de 0 jusqu'à 20%, ont été effectuées [Celik, Marar, 1996]. Au jeune âge, une amélioration de la résistance à la compression des mortiers contenant les poussières de concassage a été remarquée, bien que la demande en eau et la porosité de ces mélanges soient supérieures. Le gain de résistance au jeune âge est attribué à l'accélération de l'hydratation du aux effets de l'introduction des poussières de concassage. A long terme, aucun effet nuisible n'a été observé.

Il est montré ainsi que les sables et les fillers issus de concassage sont capables également d'améliorer les performances des BHP.

2.3 Travaux tunisiens

2.3.1 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons courants

L'épuisement des réserves en sables alluvionnaires, suite au développement urbain des grandes villes tunisiennes, nécessite des solutions de substitution de ces matériaux [Added, Bedday, 2003]. Les stocks potentiels en sable de concassage d'âge et de qualité variables, qui existent dans les différentes carrières exploitant des roches carbonatées, méritent d'être

identifiés afin d'étudier leur conformité par rapport aux exigences normatives applicables dans le domaine du bâtiment.

Pour ces raisons, l'influence du remplacement partiel ou total du sable siliceux par du sable calcaire concassé sur les performances rhéologiques et mécaniques des bétons a fait l'objet de plusieurs études. Certaines se sont intéressées aux propriétés des sables calcaires de concassage issus des principales carrières de Tunisie, en tenant compte de la qualité de la roche exploitée [Added, Bedday, 2003 ; Bedday, 2000]. Les sables analysés présentent pour la plupart des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques conformes aux exigences de la réglementation en vigueur pour les sables à bétons hydrauliques [NT 21.30, 2002], excepté pour les teneurs en fines qui sont relativement fortes en général ($> 15\%$) et pour la propreté mesurée à l'aide de l'essai de l'équivalent de sable (valeur comprise entre 17 et 86). Des analyses complémentaires ont montré également que les sables analysés peuvent être rendus conformes aux différentes exigences par de simples corrections (lavage par exemple), puisque leurs constituants minéralogiques ne renferment pas d'éléments nuisibles en forte proportion, comme les sulfates, les chlorures, les matières organiques, etc.

Les résistances à la compression obtenues sur des bétons de sables calcaires de concassage [Bedday, 2000] sont souvent supérieures à celles des bétons de sable alluvionnaire siliceux, à dosage en ciment et en eau identiques. Un sable calcaire conforme aux exigences normatives améliore sensiblement les performances du béton hydraulique [Bedday, Added, 2003]. Ces auteurs attribuent essentiellement ces améliorations à la nature calcaire, à la forme et à la granulométrie du sable. En effet, la distribution granulaire étalée, la forme anguleuse des grains et la finesse du sable calcaire concassé permettent un meilleur accrochage entre la pâte de ciment et les grains, un meilleur enchevêtrement granulaire et finalement une meilleure compacité du béton. Ainsi le béton obtenu serait plus résistant et durable [Bedday, Added, 2003].

L'influence de la finesse des fines des sables de concassage sur les caractéristiques mécaniques, rhéologiques et physiques des mortiers a été étudiée par Bedday [Bedday, 2000] dans le but d'évaluer la quantité optimale de fillers susceptible d'améliorer ou du moins ne pas dégrader les performances. Il a été observé que la quantité d'eau de gâchage augmente avec le pourcentage de fines et avec leur finesse. En ayant plus de fillers très finement broyés, la surface spécifique Blaine (SSB) des grains devient plus grande et, selon les auteurs, la quantité d'eau nécessaire pour mouiller les grains sera plus grande. Par conséquent, pour avoir

une maniabilité constante, le dosage en eau croît avec la quantité de fines et avec leur finesse. Une surface spécifique plus grande adsorbe et absorberait (?) plus d'eau, ce qui va à l'encontre de l'apport bénéfique de ces fines qui jouent un rôle lubrifiant et peuvent améliorer l'ouvrabilité [Bedday, 2000]. A l'opposé, les mélanges dépourvus de fines nécessitent aussi un besoin nettement supérieur en eau. Le manque de fines provoque une granularité discontinue et un manque de maniabilité et par la suite un apport supplémentaire en eau pour atteindre la maniabilité recherchée [Bedday, 2000]. Les résistances à 28 jours des mélanges à base de sable de concassage dont les fillers ont une surface spécifique Blaine ou SSB de 3000 cm^2/g sont supérieures à celles obtenues avec le sable normalisé [CEN EN 196-1], l'augmentation maximale est de l'ordre de 30 % pour 20 % de fines [Bedday, 2000] (Fig. 2.16).

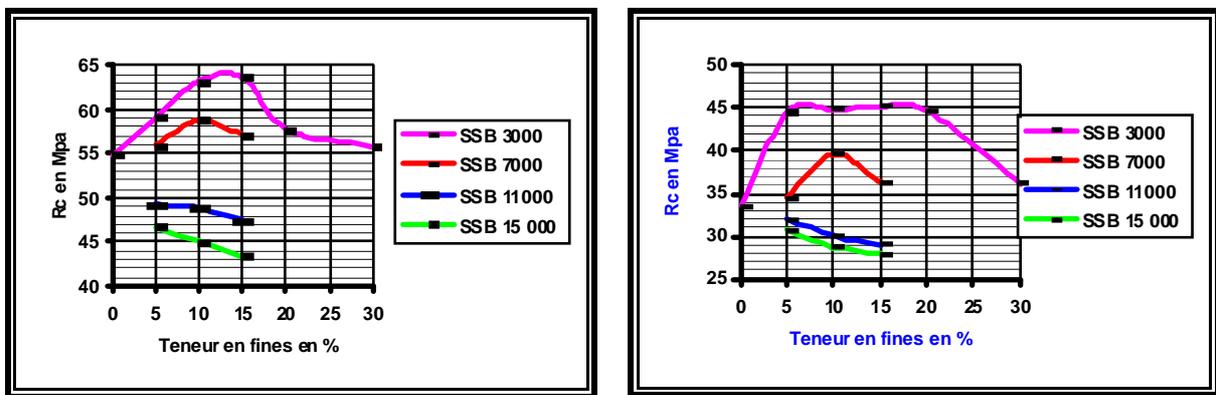


Fig. 2.16 : Résistance à la compression des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C. (Bedday, 2000)

En ce qui concerne la résistance à la flexion, elle est peu influencée par l'ajout de fines comme le montre la Fig.2.17.

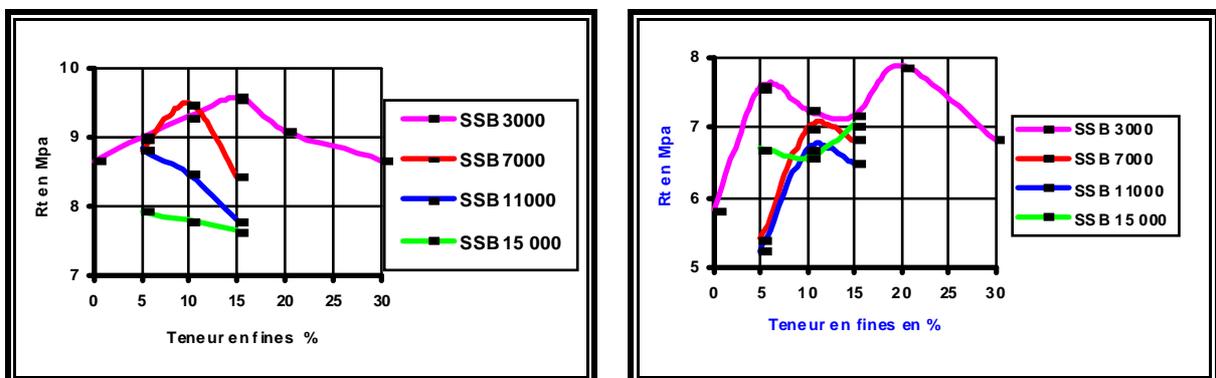


Fig. 2.17 : Résistance à la traction des mortiers à 28 jours en fonction de la teneur en fines. A gauche, hygrométrie 100% et température 20°C. A droite, hygrométrie 40% et température 38°C. (Bedday, 2000)

Les résultats obtenus montrent clairement l'apport positif des fines, surtout lorsque leur SSB est faible (3000 à 7000). Selon l'auteure, cet apport réside dans un meilleur accrochage et une plus forte adhésion entre le liant et les granulats [Bedday, 2000]. Le retrait a été étudié sur des mortiers à base de sable de concassage ayant différentes SSB et dans les conditions de chantiers tunisiens en été (hygrométrie 40 % et température 38 °C). L'allure générale des résultats obtenus à 28 j est présentée Fig. 2.18.

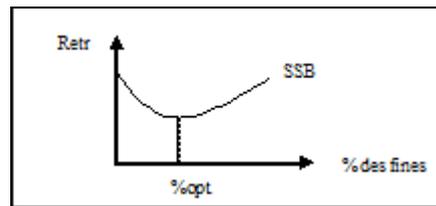


Fig. 2.18 : Retrait en fonction du pourcentage de fines

Un optimum est observé. Il est de l'ordre de :

- 5 % de fines pour les fortes SSB (11 000 et 15 000 cm²/g),
- 10 % de fines pour la SSB (7000 cm²/g),
- et 15 % de fines pour la SSB (3000 cm²/g).

Au delà de ces pourcentages, une augmentation sensible du retrait est remarquée.

La perte de masse des mortiers avec 20 % de fines de SSB 3000 cm²/g est de l'ordre de 4 %. Elle atteint 6 % pour les mortiers avec 30% de fines. Le besoin en eau supplémentaire qu'imposent la finesse et la quantité des fines, au-delà de l'optimum, pour permettre la mise en place du mortier, explique cette différence [Bedday, 2000]. La présence de fines de faible valeur de SSB conduit à une augmentation de la compacité, sans ajout d'eau, ce qui permet de limiter le retrait. Avec des fines de grandes valeurs de SSB, la quantité d'eau de gâchage est augmentée. Celle-ci va s'évaporer par la suite, ce qui conduit à une augmentation du retrait total [Bedday, 2000].

Par ailleurs, les bétons silico-calcaires confectionnés en Tunisie présentent souvent des courbes granulométriques discontinues, contrairement aux bétons tout calcaire qui montrent une continuité granulométrique entre le sable et le gravillon. La compacité et les performances des bétons ainsi réalisés sont améliorées [Bedday, 2000]. En substituant partiellement ou totalement le sable siliceux roulé par un sable de concassage de qualité (tel

que le sable de la carrière de Jbel Ressas par exemple), les caractéristiques physiques et mécaniques obtenus sont supérieures à celles du béton silico-calcaire.

La durabilité de ces bétons vis-à-vis des attaques chimiques par des solutions concentrées en Na_2SO_4 et MgSO_4 a été étudiée, conformément au mode opératoire de la norme ASTM C 88. Il apparaît que le béton de sable de concassage est plus résistant à ces sulfates que celui du béton de sable alluvionnaire [Bedday, 2000].

L'utilisation d'un sable de concassage riche en fines permet aussi de corriger la granulométrie du béton [Added, 2005].

Des mortiers ont été confectionnés avec des sables reconstitués ayant un module de finesse variant de 0,5 à 4, par pas de 0,5, et des sables reconstitués à partir d'un sable commercialisé par le CTMCCV (Centre Technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et de Verre), de nature non précisée, auquel des fines calcaires ont été ajoutées par pas de 2 [Added, 2005]. Les résistances mécaniques obtenues sont maximales pour un module de finesse de 2,5 (l'intervalle adéquat varie de 1,5 à 3,2), pour des teneurs en fines situées entre 8 et 18 %. Pour des teneurs supérieures, des chutes de résistance, allant jusqu'à 50%, sont observées [Added, 2005]. Les mortiers les plus stables ayant des caractéristiques mécaniques optimales sont ceux réalisés avec des sables ayant une propreté (Equivalent de Sable ES) comprise entre 65 et 80%. La propreté optimale est située entre 65 et 75% pour les fines de nature calcitique. Des mesures de retrait et de gonflement ont été réalisées sur ces mortiers. Les résultats ont montré que les valeurs minimales des variations volumétriques et de masse sont obtenues pour des quantités de fines variant entre 12 et 14%. Par contre, pour les teneurs en fines inférieures à 8% ou supérieures à 18%, les mortiers sont moins stables. Ces résultats obtenus avec des sables reconstitués ont été aussi validés en utilisant 24 sables naturels (siliceux et calcaires de concassage). Les mortiers confectionnés avec des sables de concassage ont donné des résistances mécaniques meilleures que celles obtenues avec les sables siliceux roulés, et même pour le sable reconstitué de qualité conseillée [Added, 2005].

L'étude réalisée par Akrouf, Mounaga, Ltfi et Ben Jamma [Akrouf *et al*, 2010] a consisté à étudier l'effet des taux de fillers des sables de concassage sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. 72 mélanges ont été formulés en utilisant trois types de sable (un sable siliceux servant de référence, un sable concassé et un sable constitué par un mélange de 60% de sable concassé et 40% de sable siliceux). Pour chaque type de sable, quatre bétons ont

été formulés : un béton ferme, un béton plastique, un autre très plastique et un béton fluide. Les résultats obtenus ont montré que les bétons formulés avec un sable calcaire concassé consomment un peu plus d'eau par rapport à des bétons à base d'un sable siliceux, à affaissement constant et pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3 . La différence observée a été attribuée au pourcentage élevé de fines du sable concassé. La résistance à la compression du béton confectionné avec le sable concassé est inférieure de 22% par rapport à celui avec le sable siliceux.

L'influence de la substitution du sable siliceux par le sable calcaire concassé vis-à-vis des attaques des ions chlorures a été aussi étudiée sur des mortiers. La diffusion des chlorures a été déterminée par deux tests ; un test de migration et un test d'immersion [Akrouf et al, 2010]. Les résultats du test de migration ont montré que le coefficient de diffusion des ions chlorures est plus grand pour le mortier de sable siliceux que pour le mortier de sable concassé [Akrouf et al, 2010]. Ce coefficient dépend aussi du rapport eau/ciment. Pour le test d'immersion, l'utilisation du sable calcaire concassé influence positivement la résistance aux chlorures ; le coefficient apparent de diffusion est toujours inférieur pour les mortiers confectionnés avec le sable concassé [Akrouf et al, 2010]. Cependant, la pénétration des chlorures augmente avec le temps d'exposition.

La faisabilité de bétons hydrauliques courants avec des granulats calcaires provenant de différents gisements tunisiens, pour limiter le recours aux granulats de bonnes caractéristiques mécanique, physique et chimique, a été étudiée par Achour [Achour, 2007]. Les ressources alluvionnaires de qualité sont surexploitées, voire épuisées, notamment à proximité des centres de consommations comme la région de Tunis et la zone touristique côtière [Achour, 2007]. Dans le cadre de cette recherche, un inventaire évaluant les potentialités du pays en matière de ressources minérales a été effectué. Il a permis de montrer que, compte tenu de l'évolution de la demande, certaines régions du pays seront déficitaires dans un futur proche. L'ouverture de nouvelles carrières est ainsi recommandée dans les formations géologiques calcaires majoritaires en Tunisie. Six gisements ont été choisis comme source d'approvisionnement potentiel apte à donner des granulats à bétons. La situation de ces carrières est repérée (en rouge) sur la carte reproduite à la Fig. 2.19.



Fig. 2.19 : Situation des carrières tunisiennes étudiées (Achour, 2007)

Les performances obtenues sur les bétons montrent que la plupart des granulats issus de ces formations peuvent répondre à priori aux exigences des normes tunisiennes en vigueur pour un emploi dans les bétons hydrauliques, comme le montre la Fig. 2.20. [Achour, 2007].

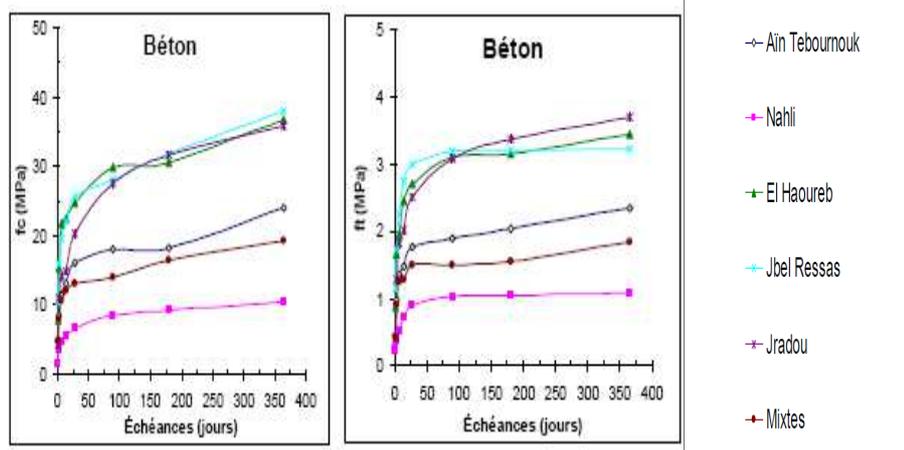


Fig. 2.20 : Performances mécanique des bétons calcaires (Achour, 2007)

Ces travaux ont contribué aussi à une meilleure connaissance du comportement mécanique des bétons calcaires. Il a été montré que le taux de fillers influe sur l'adhérence

pâte-granulat. Les fillers calcaires associées à la pâte de ciment modifient les propriétés de rigidité de la matrice, de sorte qu'elles se rapprochent de celle du granulat, améliorant ainsi l'ancrage mécanique de la liaison et la résistance à la compression [Achour *et al*, 2008].

2.3.2 Valorisation des sables de concassage et utilisation des fillers calcaires dans les bétons autoplaçants

La formulation de bétons autoplaçants (BAP) avec des matériaux locaux tunisiens, comme les sables de concassage et le sable de désert, a été étudié récemment en Tunisie [Rmili, 2010]. La substitution progressive de ces deux produits au sable alluvionnaire additionné de fillers d'apports dans la composition des BAP étudiés a permis d'analyser l'effet du type de sable sur le comportement à l'état frais et durci. Les essais ont consisté à réaliser différentes combinaisons binaires des trois sables choisis, à différentes teneur en superplastifiant (SP). Seuls sont résumés ici les résultats des mélanges sable roulé - sable de concassage.

A faible dosage en SP, les BAP se comportent à l'état frais comme des bétons ordinaires (consistance mesurée au cône d'Abrams, voir Fig. 2.21). A dosage en SP plus élevé, la substitution du sable roulé par le sable de concassage provoque une légère diminution de la fluidité, excepté pour la substitution à 30% (étalement maximum quel que soit le dosage en SP). La baisse de fluidité des autres combinaisons est attribuée à l'augmentation des frottements intergranulaires induits par les gros grains anguleux du sable de concassage. Toutefois, l'ajout d'une quantité importante en fillers permet a priori de diminuer ces frottements, comme l'indique le BAP à 100% de sable de concassage. L'utilisation partielle ou totale du sable de concassage dans les BAP conduit donc à des propriétés rhéologiques acceptables.

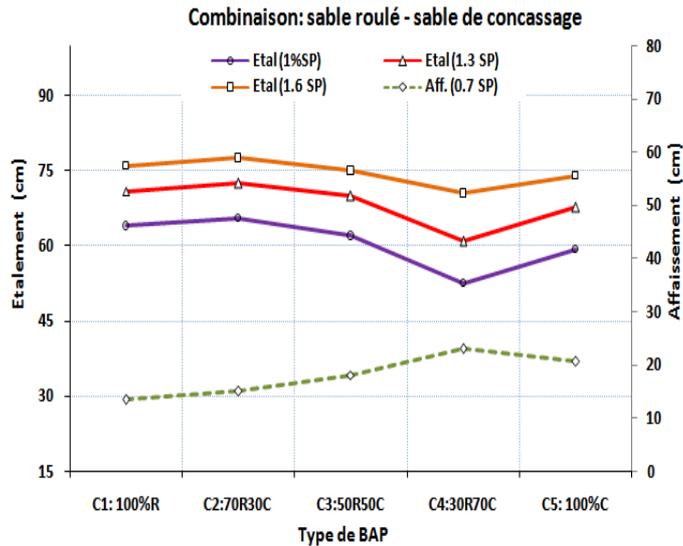


Fig. 2.21 : Courbes d'étalement au cône d'Abrams des BAP pour les différentes combinaisons de sable roulé et de sable de concassage (Rmili, 2010)

A l'état durci, la substitution progressive du sable de concassage par le sable roulé provoque une augmentation de la résistance à la compression. Elle est de l'ordre de 30 % pour les BAP ne contenant que du sable de concassage (Fig. 2.22)

A la traction, le comportement des BAP est similaire (Fig. 2.23). Les gains de résistance à la flexion et au fendage sont respectivement de 52 % et 31 % pour les BAP à 100% de sable de concassage, par rapport au BAP à 100 % de sable roulé.

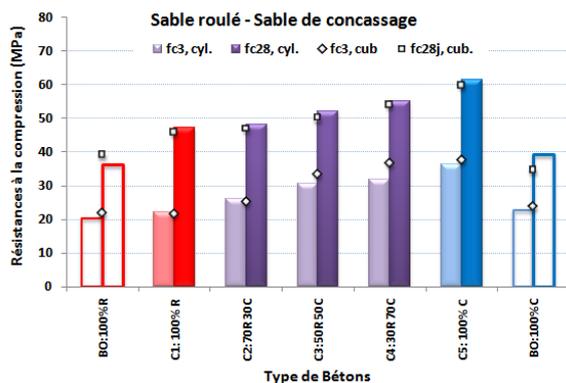


Fig. 2.22 : Résistance à la compression des BAP réalisés par Rmili (Rmili, 2010)

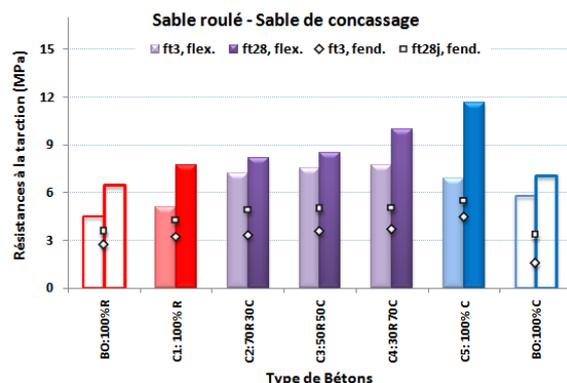


Fig. 2.23 : Résistance à la traction des BAP réalisés par Rmili (Rmili, 2010)

Par ailleurs, l'utilisation du sable de concassage diminue le coefficient d'absorption d'eau par capillarité et augmente légèrement le module d'élasticité [Rmili, 2010]. Le

remplacement partiel ou total du sable roulé par un sable de concassage dans la composition des BAP apparaît donc comme une alternative intéressante.

2.4 Les bétons ordinaires et leurs constituants

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Nous rappelons ci-après quelques généralités sur les différents composants des bétons, en particulier les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants.

2.4.1 Les granulats

Les granulats constituent le squelette, en principe inerte, du béton. Ils sont agglomérés par le liant pour former une « pierre artificielle » ; ils confèrent ainsi au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique. Pour que le squelette granulaire soit le plus compacte et le plus durable possible, il est nécessaire que les granulats satisfassent à des exigences tant au niveau de leur nature et résistance (pétrographie, minéralogie), qu'au niveau des techniques de fabrication (taille, forme, rugosité). En Tunisie, les caractéristiques des granulats à bétons sont définies dans la norme NT 21.30 dont les spécifications sont rappelées ci-après (Tab. 2.1 pour les sables et Tab. 2.2 pour les gravillons).

Granularité	Catégorie	Passant en (%) à			Commentaires
		2 Dmax	1,58 Dmax	Dmax	
	A à D	Vsi 100	Vsi 99	Vsi 85 Vss 99	
Teneur en fines en %	A	Ls 12		e 3	Teneur en fines de la fraction 0-4 mm
	B	Ls 15		e 5	
	C	Ls 18		e 6	
	D	Non spécifié			
Module de finesse	A	Li 1,8		e 0,6	
	B	Ls 3,2		e 0,7	
	C	e 0,7			
	D	e 0,8			
Absorption en %	A	Vss 2,5			
	B	Vss 5			
	C	Vss 6			
	D	Non spécifié			
LA	A	Vss 40			
	B				
	C	Vss40			
	D	Vss 50			
Friabilité	A à D	Vss 60 %			NFP 18 541 de 1994
Propreté	A	Vsi 65 %			ES piston sur le 0-2 mm limité à 10 % de fines
	B à D	Vsi 60 %			
Valeur de Bleu V_B	A à D	Vss 1			Essai sur 0-2 mm
Matière organique	Essai colorimétrique négatif				
Soufre total en % (en poids)	A	0,4			Exprimé en S %
	B	1			
	C	1			
	D	1,5			
Sulfates exprimés en % de SO_3 en poids	A- B - C	0,2			Si S total > 0,08 %
	D	0,3			
Impuretés prohibées chlorures	A à D	Vss 0,1 %			
	A à D	Vss 0,02 %			
Na_2O équivalent actif	A à D	Vss 0,01 %			

Tab. 2.1 : Spécification des sables à béton selon la norme NT 21.30

	Catégorie	Passant en (%) à					
		2 D*	1.58 D*	D*	(d+D*)/2	d	0.63 d
Granularité	A	Vsi 100	Vsi 99	Li 80 Ls 99 e 15	Li 25 Ls 75 e 35	Li 1 Ls 20 e 15	Vss 5
	B				Li 20		
	C			e 19	Ls 80 e 40	e 19	
	D	Pas de spécifications					
	Catégorie	Vss			Commentaires		
Los Angeles	A	30					
	B et C	40					
	D	50					
Propreté en %	A à D	1,5 : gravier non concassé 3 : gravier concassé					
Coefficient d'aplatissement en %	A	20			Avec IC ≥ 50 et VBF ≤ 10 (VBF sur le 0/0,125 mm en g/Kg)		
	B et C	30					
	D	40					
Teneur en boules d'argiles	A à D	1					
Matière organique	Essai colorimétrique négatif						
Soufre total en % (en poids)	A	0,4			Exprimé en S %		
	B	1					
	C	1					
	D	1,5					
Sulfates exprimés en % de SO₃ en poids	A- B - C	0,2			Si S total > 0,08 %		
	D	0,3					
Impuretés prohibées	A à D	0,1 %					
chlorures	A à D	0,02 %					
Na₂O équivalent actif	A à D	0,01 %					

Tab.2. 2 : Spécifications des gravillons à béton selon la norme NT 21.30

Avec :

A, B, C et D : Classe de répartition des granulats

D* : D_{max} de la granulométrie des granulats

Vsi : Valeur spécifiée inférieure

Vss : Valeur spécifiée supérieure

Li : Limite inférieure

Ls : Limite supérieure

e : étendue

2.4.2 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement, même sous l'eau. C'est un constituant de base du béton.

Le ciment Portland est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange artificiel soigneusement dosé et homogénéisé, de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile. Le produit obtenu après refroidissement brusque à l'air est le clinker. Durant la cuisson, les composants du mélange cru se décomposent et se recombinent entre eux pour former les minéraux du clinker. Leur écriture chimique utilise de façon simplifiée les lettres C pour CaO (chaux), S pour SiO₂ (silice), A pour Al₂O₃ (alumine) et F pour Fe₂O₃ (oxyde de fer). Ces minéraux sont :

- Le silicate tricalcique C3S (3CaO,SiO₂): appelé aussi Alite. La teneur normale en C3S du clinker est comprise entre 50 et 65 %.
- Le silicate bicalcique C2S (2CaO,SiO₂): appelé aussi bélite. La teneur normale en C2S du clinker varie entre 15 et 25 %.
- L'aluminate tricalcique C3A (3CaO,Al₂O₃): appelé aussi célite. La teneur normale en C3A du clinker varie entre 4 et 12 %.
- L'alumino-ferrite tétracalcique (C₄AF) ou brownmillérite. La teneur normale en C₄AF du clinker est comprise entre 0 (ciment blanc) et 10 %.

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux définis par la norme EN 197-1 :

- CEM I: Ciment portland,
- CEM II: Ciment portland composé,
- CEM III: Ciment de haut fourneau,
- CEM IV: Ciment pouzzolanique,
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres.

Les proportions (en masse) des différents constituants sont indiquées dans le tableau 2.3. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%.

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut-fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment composé	
	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C	CEM IV/A	CEM IV/B	CEM V/A	CEM V/B
Clinker (K)	≥ 95 %	≥ 80 % ≤ 94 %	≥ 65 % ≤ 79 %	≥ 35 % ≤ 64 %	≥ 20 % ≤ 34 %	≥ 5 % ≤ 19 %	≥ 65 % ≤ 89 %	≥ 45 % ≤ 64 %	≥ 40 % ≤ 64 %	≥ 20 % ≤ 38 %
Laitier (S)	*	6 % ≤	6 % ≤	≥ 36 % ≤ 65 %	≥ 66 % ≤ 80 %	≥ 81 % ≤ 95 %	*	*	≥ 18 % ≤ 30 %	≥ 31 % ≤ 50 %
Pouzzolanes (P ou Q)	*	total	total	*	*	*	11 % ≤ total	36 % ≤ total	18 % ≤ total	31 % ≤ total
Cendres siliceuses (V)	*	≤ 20 %	≤ 35 %	*	*	*	≤ 35 % (fumée)	≤ 55 % (fumée)	≤ 30 %	≤ 50 %
Fumée de silice (D)	*	(fumée)	(fumée)	*	*	*	≤ 10 %	≤ 10 %	*	*
Cendres calcaires (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L ou LL)	*	≤ 10 %	≤ 10 %	*	*	*	*	*	*	*
Fillers	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tab.2. 3 : Désignation des différents ciments en fonction de leur composition

Trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance minimale à 28 jours et une sous classe "R" ou "N" est associée pour désigner les ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées ou normale. Les spécifications de ces classes sont rappelées dans le tableau 2.3.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1 (et P15-301)				Retrait à 28 jours (1) P15-433 (µm/m)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (mm)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini	maxi			
32,5 N		≥ 16,0 14	≥ 32,5 30	≤ 52,5	≤ 800	≥ 75 (90) 60 (90)	≤ 10
32,5 R	≥ 10 (13,5) 8 (12)		≥ 32,5 30	≤ 52,5	≤ 1 000	≥ 75 (90) 60 (90)	≤ 10
42,5 N	≥ 10 (12,5) 10		≥ 42,5 40	≤ 62,5	≤ 1 000	≥ 60 50 (60)	≤ 10
42,5 R	≥ 20 18		≥ 42,5 40	≤ 62,5	≤ 1 000	≥ 60 50 (60)	≤ 10
52,5 N	≥ 20 18		≥ 52,5 50			≥ 45 (60) 40 (60)	≤ 10
52,5 R	≥ 30 28		≥ 52,5 50			≥ 45 (60) 40 (60)	≤ 10

Tab.2. 4 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

2.4.3 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques d'origines organique ou inorganique, le plus souvent sous forme liquide. Leur dosage ne doit pas dépasser 5% du poids du ciment et ils sont incorporés dans le béton lors du malaxage ou de la mise en œuvre.

Les superplastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau. La polymérisation produit de longues chaînes moléculaires très denses. Ces dernières vont s'enrouler autour des grains de ciment et vont leur donner une charge hautement négative, de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres, conduisant à une défloculation et une dispersion des grains de ciment. La répulsion est dite électrostatique dans le cas des superplastifiants de type polysulfonates. Dans le cas des superplastifiants de type polycarboxylates, la répulsion est dite stérique et elle permet en principe une action fluidifiante prolongée.

L'emploi de superplastifiant permet d'améliorer la maniabilité et de réaliser des bétons à très haute résistance en réduisant le rapport e/c. leur dosage doit être contrôlé afin d'éviter des problèmes comme la perte de maniabilité dans le temps (la quantité de molécules de superplastifiant disponible n'est pas suffisante pour empêcher la réagglomération des grains de ciment). Des surdosages peuvent entraîner des effets secondaires comme un retard de prise.

2.4.4 L'eau

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau. Introduite dans le béton lors de sa fabrication, elle va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère aux bétons frais les propriétés rhéologiques d'un pseudo-liquide permettant l'écoulement et le moulage ; une fonction chimique d'hydratation du ciment qui apporte la résistance mécanique.

2.5 Les bétons autoplaçants

2.5.1 Définition

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, en principe. Les Bétons AutoNivelants (BAN) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, planchers). Leur utilisation s'accompagne toujours de l'emploi indispensable d'un produit de cure.

L'expérience Japonaise a montré les intérêts technico-économiques suivants pour les BAP et les BAN :

- amélioration de la sécurité
- gain de productivité
- possibilité de réaliser des éléments de géométrie complexes et/ou très ferrillés
- 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

2.5.2 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.

2.5.3 Propriétés des BAP à l'état durci

En plus des essais de performance 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...

2.5.4 Conditions de réalisation des BAP

La réalisation des BAP nécessite le respect d'un certain nombre de conditions rappelées ci-après.

Un volume de pâte élevé

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. Pour cette raison, il faut une quantité de pâte importante (ciment + additions + eau + air), de l'ordre de 330 à 400 l/m³, dont le rôle est de :

- augmenter la capacité de remplissage
- écarter les granulats les uns des autres et annuler les frictions et les collisions inter granulaires.
- réduire le rapport eau/liant afin de limiter la ségrégation et de réduire le tassement et le ressuage. Un rapport de 0,3 à 0,5 est recommandé.

Une quantité de fines élevée

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
- des fillers calcaires qui réduisent la demande en eau pour une maniabilité fixée.

Les paramètres recommandés de formulation des BAP [EFNARC, 2002 ; AFGC, 2000], sont rappelées 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 égal à $0.27 \leq V_{gg} \leq 0.36$,
- volume de mortier compris entre $0.65 \leq VM \leq 0.75$,
- rapport eau/liant de l'ordre de $0.30 \leq E/L \leq 0.45$,
- rapport eau/ciment compris entre $0.50 \leq E/C \leq 0.60$,

Utilisation de superplastifiants (SP)

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
- libérant une partie de l'eau piégée par les grains de ciment floclés
- diminuant les frictions inter granulaires
- améliorant l'ouvrabilité de béton

Agents de viscosité

Les agents de viscosité sont des agents colloïdaux dérivés des celluloses et des polymères. Leur rôle est d'améliorer la viscosité, 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, 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.

Gravillons

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 confiné. 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.

2.6 Conclusion

On constate que l'utilisation des sables calcaires de concassage et des fillers calcaires dans la formulation des mortiers et des bétons a fait déjà l'objet de plusieurs études et recherches, aussi bien dans les pays de Maghreb que dans les pays européens et ailleurs dans le monde. Elles ont été menées le plus souvent dans le but d'encourager l'utilisation de ces matériaux en tant qu'alternative aux granulats alluvionnaires en voie d'épuisement. Mais, jusqu'à présents, ces études n'ont pas abouti partout puisque l'utilisation du sable de concassage dans le secteur du bâtiment et des centrales à bétons ne s'est pas encore concrétisé, comme en Tunisie par exemple. En effet, bien que l'avantage économique et environnemental de l'emploi de ces matériaux dans les bétons hydrauliques paraisse démontré, ils ne sont pas encore utilisés dans la formulation des bétons hydrauliques en Tunisie, du moins à l'échelle industrielle. Les maîtres d'ouvrages et les entreprises refusent jusqu'à présent de recourir à ces bétons, faute probablement d'exemples de réalisation servant de références, sous forme d'ouvrages pilote ou de chantiers expérimentaux...

Par ailleurs, la plupart des études ont été réalisées sur des mortiers en substituant une part du ciment ou bien du sable par des fillers calcaires. Les sables peuvent être constitués soit d'un mélange de sable alluvionnaire et de sable de concassage, soit de sable de concassage seul. D'autres études se sont intéressées à des bétons en substituant le sable alluvionnaire ou le sable de mer par du sable de concassage.

Il apparaît donc nécessaire de compléter les travaux déjà réalisés par une étude théorique et expérimentale rationnelle destinée à conforter les connaissances déjà acquises et à en proposer si possible de nouvelles pouvant servir par exemple à la modélisation. Il s'agit aussi de statuer sur la pertinence des spécifications normatives des sables à béton actuelles, en particulier pour ce qui concerne le taux de fillers, et de les faire admettre, par l'exemple

notamment, à la communauté scientifique et industrielle tunisienne, selon la démarche récemment entreprise par le Ministère de l'Habitat et de l'Aménagement des Territoires.

Cette recherche doit non seulement concerner les bétons traditionnels, mais aussi les bétons superplastifiés et les BAP dans lesquels la teneur en fillers joue un rôle déterminant. Cet aspect n'a pas encore fait l'objet de recherches avérées en Tunisie, où les études sur ces bétons ont été réalisées avec des fillers calcaires livrés en sacs le plus souvent, et non pas amenés avec le sables concassage. Cette solution pourrait constituer un vecteur original conduisant les praticiens à l'utilisation des sables calcaires fillérisés dans les bétons hydrauliques.

L'approche adoptée dans le cadre de ces travaux est donc différente de ce qui a déjà été fait jusqu'à présent. Le plan de la partie expérimentale, ainsi que les démarches suivies, sont détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

IDENTIFICATION ET PREPARATION DES MATERIAUX

3.1 Introduction

Le présent chapitre s'intéresse à l'identification et la préparation des matériaux de l'étude. On justifie tout d'abord le choix de la carrière apte à fournir les granulats, sur la base de son contexte général, régional et géologique. Les classes granulaires retenues pour l'étude, le choix du type du ciment ainsi que sa provenance, le choix du superplastifiant utilisé et le mode de conservation des matériaux sont aussi présentés.

Ce chapitre présente ensuite les étapes de préparation des matériaux. En premier lieu, il décrit la méthode adoptée pour séparer le sable propre et les fillers calcaires, ainsi que la manière dont les fillers calcaires ont été récupérés. En second lieu, le procédé de fabrication retenu pour avoir cinq sables ayant la même minéralogie et un taux de fillers variable est présenté. Les sables ainsi fabriqués correspondent aux cinq catégories de la norme européenne EN 12620.

Enfin, ce chapitre présente les propriétés des matériaux de l'étude. Les propriétés physiques et mécaniques des granulats ont été mesurées selon les normes tunisiennes ou AFNOR en vigueur. Les compositions chimiques et minéralogiques de tous les matériaux utilisés (granulats, fillers calcaires et ciment) ont été déterminées par fluorescence X et par diffractométrie de rayons X (DRX). Des propriétés spécifiques à l'utilisation du logiciel BétonlabPro2 ont été mesurées. Il s'agit de la compacité des granulats et des fines (ciment et fillers calcaires), et du dosage de saturation en superplastifiant pour le ciment et les fillers calcaires. Pour le superplastifiant utilisé, sa masse volumique, sa teneur en eau et son extrait sec ont aussi été mesurés.

3.2 Choix des matériaux

3.2.1 Choix de la carrière

Le nombre total des carrières de granulats concassés en Tunisie est de l'ordre de 3000 dont 1000 environ sont en activité. Celles-ci se répartissent en carrières industrielles (25 %) et en carrières artisanales (75 %) [Zneidi, 2007].



Fig. 3.1 : Répartition géographique des régions [Achour, 2007]

La Direction des Carrières et des Explosifs a subdivisé le pays en six régions regroupant chacune plusieurs gouvernorats [MEHAT, 2000], Fig. 3.1 et Tab. 3.1.

Régions	Nord-Est	Nord-Ouest	Centre-Est	Centre-Ouest	Sud-Est	Sud-Ouest
Gouvernorats	District de Tunis	Béja	Sousse	Kairouan	Gabès	Gafsa
	Nabeul	Jendouba	Monastir	Kasserine	Médénine	Tozeur
	Zaghuan	Kef	Mahdia	Sidi Bou Zid	Tataouine	Kébili
	Bizerte	Siliana	Sfax			

Tab. 3.1 : Subdivision du pays en régions et gouvernorats [MEHAT, 2000]

Les carrières industrielles sont situées sur la Fig. 3.2.



Fig. 3.2 : Répartition géographique des carrières industrielles de granulats concassés en Tunisie [Zneidi, 2007]

Les travaux de [Bedday, 2000 ; Added, Bedday, 2003 ; Added, 2005] ont permis de dresser un bilan des différents massifs aptes à produire des granulats en Tunisie, avec les caractéristiques des matériaux issus de chaque carrière. Les différentes propriétés des matériaux sont reprises dans le Tab .3.2.

Carrière	Jbel Ressas	Jbel Kebir	Jbel Ouest	Nahli	Mayana	El Houareb	Jbel Ichkeul	Kef	Mednine	F. Jedid	Jbel Aziz
Taux de fines	10-14,7	39-45	10-14	11-18	12-16	16-21	23-29	18-19	14-24	12-20	10-14
Mf	2,8-3,3	1,5-1,8	2,7-3,2	2,4-3,1	2,5-2,9	1,9-2,5	1,9-2,5	1,9-2,7	2-2,6	2,6-3,2	2,9-3
Sable	Un peu trop grossier	Un peu trop fin	Un peu trop grossier	Un peu trop grossier	Un peu trop grossier	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Un peu trop grossier	Un peu trop grossier
Classement selon NF X PP 18 540	A	D	A	C	A	A	A	D	A	A	A
ES	73-86	17-20	71-84	25-64	65-76	43-70	54-63	36-37	24-68	35-70	49-74
Classement selon ES	A	D	A	A à D	A	A à D	B	D	A à D	A à D	A à D
VB des fines (<80µm)	0,03-0,16	0,1-0,5	0,05-0,18	0,2-0,6	0,07-0,2	0,08-0,45	0,045-0,12	0,32-0,63	0,05-0,15	0,17-0,39	0,13-0,28
VB des sables (0 – 2mm)	0,03-0,24	0,39-2,25	0,05-0,25	0,22-1,08	0,08-0,32	0,13-0,94	0,1-0,35	0,58-1,2	0,07-0,36	0,20-0,78	0,13-0,39
ρ_a (g/cm ³)	1,54-1,74	1,28-1,39	1,5-1,73	1,22-1,49	1,46-1,64	1,63-1,78	1,36-1,60	1,3-1,38	1,45-1,66	1,39-1,46	1,31-1,58
ρ_r (g/cm ³)	2,68-2,72	2,30-2,35	2,62-2,67	2,50-2,58	2,60-2,65	2,65-2,74	2,58-2,62	2,50-2,62	2,61-2,76	2,53-2,56	2,60-2,65
K ₂ O	0-0,05	0,2-0,4	0,03-0,05	0,13-0,16	0,03-0,04	0,26-0,30	0-0,06	0,1-0,3	0,3-0,5	0,2-0,3	-
Na ₂ O	0,02-0,07	0,04-0,06	0-0,02	0,02-0,04	0-0,03	0,04-0,08	0,03-0,08	0,01-0,03	0,01-0,03	0,03-0,07	-
CaCO ₃	94-97	86-89	95-98	84-94	94-96	68-72	93-98	85-89	80-83	88-92	-
Fe ₂ O ₃	0,04-0,2	0,63-0,72	0,05-0,07	0,2-0,3	0,05-0,07	1,25-1,30	0,05-0,30	0,09-0,15	1,15-1,20	0,37-0,41	-
Al ₂ O ₃	0-0,25	1,7-1,9	0,05-0,07	0,6-3	0,05-0,06	1,33-2,22	0,3-0,5	2,30-2,50	0,31-0,4	1,13-1,22	-
MgO	0,6-0,75	0,65-0,72	0,27-0,30	0,19-0,24	0,27-0,05	12-14	0,2-0,7	0,25-0,30	14-15	0,79-0,82	-
CaO	51-53	47-49	52-54	47-52	52-53	30-32	52-54	46-48	35-37	48-50	-
SiO ₂	0-0,8	8,7-8,9	0,21-0,25	3,5-4,5	0,20-0,30	15-16	0,2-0,6	7,7-7,9	2,1-2,5	7,75-7,95	-
SO ₃	0,1-0,35	0,06-0,08	0,01-0,02	0,1-0,5	0,01-0,02	0,04-0,05	0,01-0,04	0,06-0,09	0,03-0,05	0,1-0,15	-
P.F	43-44	39-40	43-44	37-42	42-43	38-39	41-43	39-41	45-46	40-42	-
Alcalins totaux équival. (%)	0,02 - 0,1	0,17-0,32	0,02 - 0,05	0,11-0,15	0,02-0,06	0,21-0,27	0,03 - 0,09	0,07-0,22	0,2-0,36	0,16-0,27	-
Alcalins actifs éq (%)	0,001-0,005	0,0085-0,016	0,001 - 0,0025	0,0055 - 0,0075	0,001 - 0,003	0,0105-0,0135	0,001 - 0,0025	0,0035-0,011	0,01-0,018	0,008-0,0135	-

Tab .3.2 : Caractéristiques des différentes carrières [Bedday, 2000 ; Added, Bedday, 2003 ; Added, 2005].

Après analyse de ces données et en tenant compte aussi de l'intérêt stratégique des carrières (contextes général, régional et géologique), notre choix s'est porté sur la carrière de Jbel Ressas (voir Fig. 3.3.a et Fig. 3.3.b).



Fig.3. 3.a : Vue d'ensemble de la carrière de Jbel Ressas et du front de taille



Fig. 3.3.b : Détail de l'exploitation de la carrière Jbel Ressas

Contexte général

La carrière de Jbel Ressas appartient à la société « Les Grandes Carrières du Nord » ou GCN. C'est une société spécialisée dans le concassage, le criblage et l'élaboration de granulats, ainsi que dans la fabrication de grave bitume. Elle produit des grandes quantités de matériaux qui sont réputés pour leurs bonnes caractéristiques. Elle est considérée par le Ministère de l'Équipement comme l'un des meilleurs gisements de calcaire dur en Tunisie.

Ses granulats sont utilisés aujourd'hui dans plusieurs domaines des travaux publics notamment dans les assises de chaussées,

Sa production est estimée à 10 000 à 12 000 tonnes de granulats par jour, ce qui équivaut à 250 000 à 300 000 tonnes/mois de matériaux traités répondant à différents types de granulométries, avec possibilité de fourniture de 1500 à 2000 tonnes/jour d'encrochements [Zneidi, 2007].

La société GCN a accepté de participer à cette recherche en élaborant et fournissant gracieusement les granulats. Merci.

Contexte régional

Jbel Ressas est l'un des sites de production de granulats les plus exploités dans le Nord de la Tunisie. Il est situé à proximité de la localité de Mornag, sise à une vingtaine de kilomètres de Tunis et à 15 Km au Sud du Golfe de Tunis.

La Fig. 3.4 indique sa localisation dans le gouvernorat de Tunis. La carrière GCN exploite les calcaires massifs, stratifiés et durs affleurant de la partie EST du Jbel Ressas.



Fig. 3.4 : Localisation de la carrière Jbel Ressas [Google Maps - ©2012 Google]

Contexte géologique

Jbel Ressas fait partie des massifs jurassiques qui balisent la grande faille de Zaghouan et qui forment l'élément structural majeur du pays : celui de la dorsale tunisienne. Il est situé entre les deux grands massifs jurassiques, le Jebel Bou Kornine de Hammam Lif au Nord Est et le Jebel Zaghouan au Sud - Ouest [Zneidi, 2007].

De point de vue morphologique et orographique, le massif Ressas a une forme grossièrement elliptique orientée NNE –SSW d'environ 3,5 Km de long sur 1,5 Km de large.

Le massif est divisé en deux grandes parties séparées par un col d'altitude 477m :

- au NNE, le petit Ressas tabulaire dont l'altitude atteint 500m ;
- au SSW, le grand Ressas, pyramidal et très escarpé, qui culmine au pic de Bou Améma à la côte de 795 m.

A l'Ouest, ces deux éléments présentent des escarpements rocheux de 200 à 300 m de hauteur qui forment la limite avec la plaine de Mornag.

Les calcaires et dolomies du Jurassique constituent l'ossature de cette structure [Zneidi, 2007]. L'esquisse géologique du secteur (Fig. 3.5) montre les terrains géologiques suivants [Bujalka *et al.*, 1971] :

- **le Trias (T)** : affleure au Nord et au Sud du massif où il est en contact anormal avec le Jurassique et les terrains du Crétacé. Ses faciès sont représentés par des brèches gypseuses à blocs phyllithiques, des cargneules, des calcaires dolomitiques et des argiles bariolées. On rencontre souvent des minéraux de néoformation comme le quartz bipyramidé et la pyrite.

- **le Jurassique** représenté par :

- une épaisse série liasique (jurassique inférieur) formée par une entité dolomitique et des calcaires bioclastiques. Il s'agit de la formation **Oust** (formations principales de la carrière).
- des calcaires récifaux et bioclastiques du Malm (jurassique moyen) attribués à la formation **Ressas**.
- Le Dogger (jurassique supérieur) est très réduit, avec des calcaires biodétritiques, des alternances marno-calcaires et des calcaires noduleux.

- **le Crétacé** : représenté essentiellement par le Crétacé inférieur. Il cerne le massif et il est formé principalement par des calcaires fins gréseux organodétritiques du Berriasien, des alternances de marnes et de calcaires marneux débités en plaquettes et des calcaires argileux très durs.

- Les formations plus récentes du *Tertiaire* ne concernent pas la zone de la carrière.

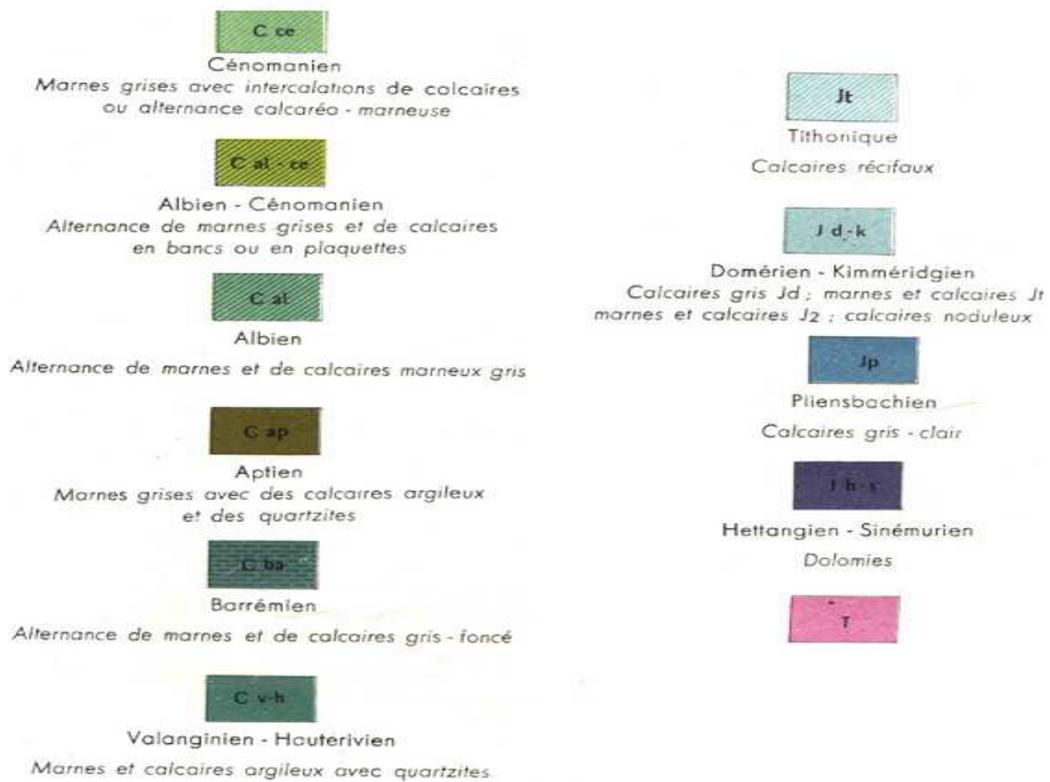
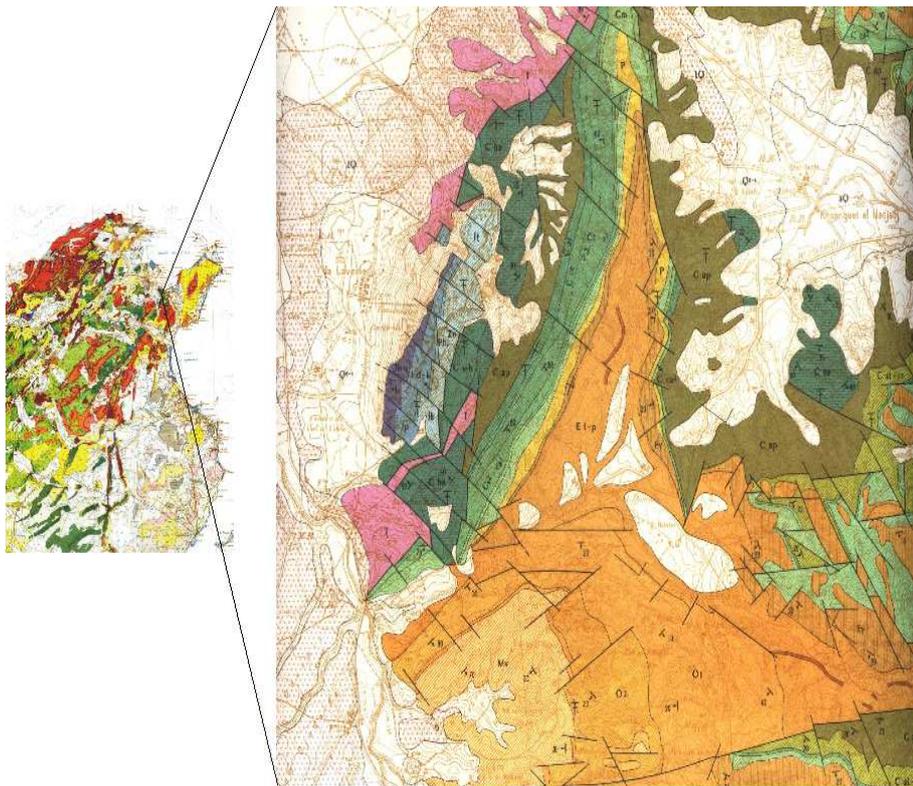


Fig. 3.5 : Cadre géologique du secteur d'étude extraite de la carte géologique au 1/50 000 de Grombalia [Bujalka *et al.*, 1971].

D'un point de vue structural et tectonique, deux accidents majeurs ont sculpté la morpho-structure de la carrière [Zneidi, 2007]. La grande faille de Zaghouan (AZ) [Turki,1985] qui longe la base du flanc oriental et se raccorde au Nord et au Sud aux affleurements du Trias. Une faille (AC) orientée grossièrement NW-SE qui coupe le Jbel Ressay en deux (Fig. 3.6).

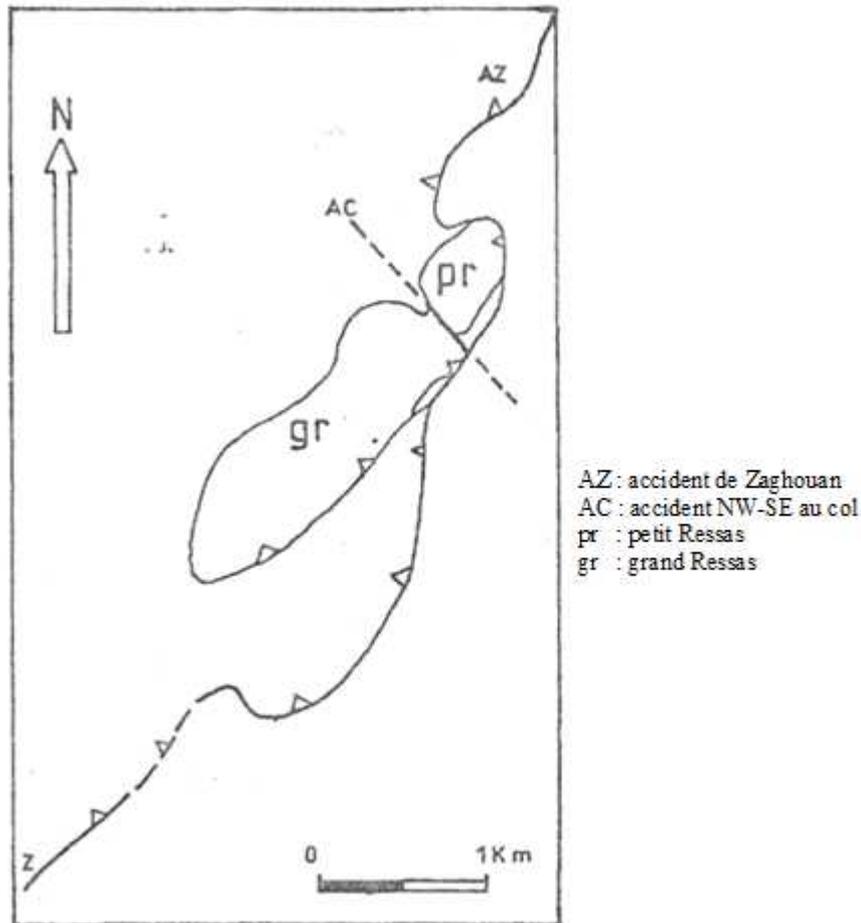


Fig.3. 6 : Cadre structural du massif Ressay [Turki, 1985]

Dans le détail, la carrière de Jbel Ressay est composée d'unités jurassiques de nature et de puissances différentes [CTMCCV, 1989 ; MEHAT, 1994]. Du Nord-Ouest au Sud-Est, on rencontre les niveaux suivants [Turki, 1985] (Fig. 3.7) :

- Les formations liasiques du front Ouest, avec :
 - des calcaires gris noirs à silex, biodétritiques, d'âge Sinémurien-Carixien
 - des calcaires marneux gris noirs à verdâtres en bancs décimétriques, des calcaires gris foncé biodétritiques à ciment calcitique en bancs

centimétriques, et des calcaires marneux gris foncé et gris clair en bancs massifs. L'ensemble est d'âge Domérien,

- une alternance de marnes beiges et de calcaires marneux beige ou gris bleu du Toarcien.
- Les formations du Dogger du front central, avec :
 - des calcaires marneux verdâtre ou gris verdâtre riche en fossiles,
 - des calcaires noirâtres à gris foncé noduleux en petits bancs stratifiés, avec intercalations locales de marnes beiges..
- Les formations du Malm du front Est, avec :
 - des calcaires marneux bariolés (verdâtre, rougeâtre ou en lie de vin), en bancs centimétriques parfois cachés par des niveaux argileux
 - des calcaires biodétritiques gris à gris foncé en bancs centimétriques, avec des fractures et microfractures remplies par une minéralisation le calcitique et une faune benthique abondante.
 - des calcaires crayeux à patine blanchâtre et d'aspect friable
 - des niveaux calcaires biodétritiques grisâtres à foncés caractérisés par la présence de « birds eyes » calcitique dans les fractures, des poches karstiques et une faune abondante

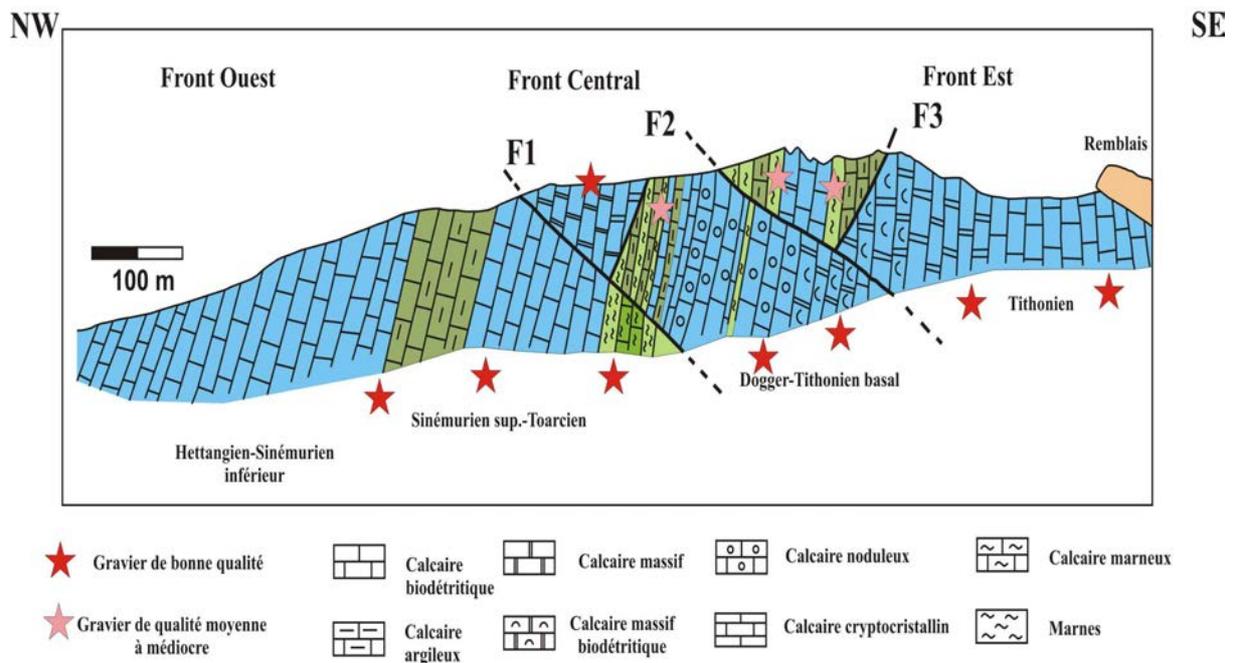


Fig. 3.7 : Coupe synthétique transversale NW-SE de la série exploitée [Zneidi, 2007]

La structuration du massif témoigne de la complexité des mouvements tectoniques et des phénomènes géologiques qu'ont connues ces séries. Ces phénomènes et le métamorphisme associé ont certainement eu un impact sur l'amélioration de certaines propriétés intrinsèques des niveaux exploités. Les forts pendages observés constituent la difficulté majeure de l'exploitation du site. Elle se fait entre les altitudes 200 et 500 m. Elle est organisée en gradins de 15 à 20 m de hauteur (Fig. 3.3a).

Les roches calcaires (Fig. 3.8) sont qualifiées de « moyennement dures ». Elles sont formées à plus de 95% par du carbonate de calcium. Les granulats produits sont d'excellente qualité.



Fig. 3.8 : Roche calcaire de Jbel Ressay

3.2.2 Choix des granulats

Un sable concassé fillérisé 0/4 a été choisi pour l'étude. Il a été élaboré spécifiquement par le carrier avec le souhait de produire un maximum de fines pour pouvoir élaborer ensuite les différents sables par mélange. Le matériau livré, issu d'un concassage secondaire giratoire, contenait 16 % de fines.

Ce sable a été conservé dans des « big bags » disposés sur des palettes afin d'assurer une meilleure préservation vis-à-vis des pollutions extérieures (Fig. 3.9).

Deux gravillons ont été utilisés. Un gravillon 4/8 et un gravillon 10/20. Ils ont été déversés en tas sur des bâches et recouverts par d'autres bâches.



Fig. 3.9 : Conservation du sable calcaire

3.2.3 Ciment

Un ciment portland CEM I 42,5 N a été choisi pour la fabrication de tous les mélanges. Il s'agit d'un ciment de couleur gris clair sans constituants secondaires. Il a été fourni par la Cimenterie « CAT - Les ciments artificiels tunisiens – COLACEM » et il a été approvisionné en une seule fois. Il a été stocké dans son emballage au dessus d'une palette et recouvert par une bâche (voir Fig. 3.10).



Fig. 3.10 : Conservation du ciment CEM I 42,5 N

3.2.4 Adjuvant

L'adjuvant choisi pour l'étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau dont le nom commercial est « SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 ». C'est un superplastifiant polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Il se présente sous la forme d'un liquide brun clair.

Il permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et/ou pompés. Il confère aux bétons une bonne tenue rhéologique (>2h) et une robustesse à la ségrégation.

3.3 Préparation des matériaux de l'étude

3.3.1 Lavage du sable initial et récupération des fillers calcaires

Le sable de concassage 0/4 élaboré spécifiquement par le carrier (16 % de fines) a été séparé en deux parties. La première a été conservée telle qu'elle (voir Fig. 3.9). La seconde a été fractionnée en deux coupures constituées de la fraction fine (< 80 μ m) et de la fraction grenue (> 80 μ m).

Pour réaliser cette étape, le sable a été soigneusement lavé au laboratoire par fraction successives. Chaque prélèvement a été soumis à un puissant jet d'eau dans un bac haut et étroit. Les fines mis en suspension ont ensuite été évacuées aussitôt en déversant l'eau à travers un tamis de 80 μ m. L'opération a été répétée plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'une eau claire, indiquant que toutes les fines du sable ont été évacuées. L'eau de lavage a été intégralement préservée dans d'autres bacs où les fines ont pu sédimenter jusqu'à l'obtention d'une eau parfaitement claire (après deux jours en général). Après siphonage, la fraction fine a été récupérée sans perte (Fig. 3.11).



Fig. 3.11 : Fillers calcaires après récupération

Les fillers calcaires obtenus sont référencés FC. Ils ont été homogénéisés et conservés à l'état de terre humide dans des conteneurs hermétiquement fermés jusqu'au moment de leur utilisation.

La fraction grenue de sable lavé a été conservée humide en « big bags » (Fig. 3.12).

La teneur en eau des deux fractions a été mesurée et prise en compte pour chaque réalisation de béton.



Fig. 3.12 : Conservation de la fraction grenue du sable lavé

3.3.2 Composition des sables à différents taux de fillers

L'objet de la recherche est de montrer la possibilité d'utiliser des sables calcaires de concassage dans la confection des bétons, et plus particulièrement des sables à forte teneur en

fines. Pour analyser le rôle de ces fines, la démarche retenue est de se référer à des résultats expérimentaux où des bétons avec différentes teneurs en fines sont réalisés. Plusieurs solutions sont possibles pour atteindre l'objectif visé. On peut par exemple utiliser des sables de concassage provenant de diverses carrières ayant « naturellement » des taux de fillers différents. On peut aussi utiliser le sable calcaire d'une carrière et ajouter des fillers calcaires commerciaux en différentes proportions. Dans ces deux approches, les constituants n'ont pas les mêmes propriétés physiques et minéralogiques, ce qui conduit à ajouter une variable au problème, dont on ne mesure pas la réelle influence.

Pour éviter tout artéfact et n'étudier que le rôle de la quantité de fines, on a choisi de réaliser une série de bétons dont tous les constituants sont de même nature (mêmes granulats calcaires et même ciment, à même dosage). La seule variable étant alors le taux de fillers.

Dans ce but, cinq sables de même nature minéralogique mais de granularité différente (taux de fines) ont été fabriqués par combinaison du sable d'origine soit avec les fillers FC récupérées, soit avec le sable lavé. Ces sables ont été fabriqués en quantités suffisantes pour réaliser les bétons du programme. La figure 3.13 illustre les étapes d'obtention de ces sables.

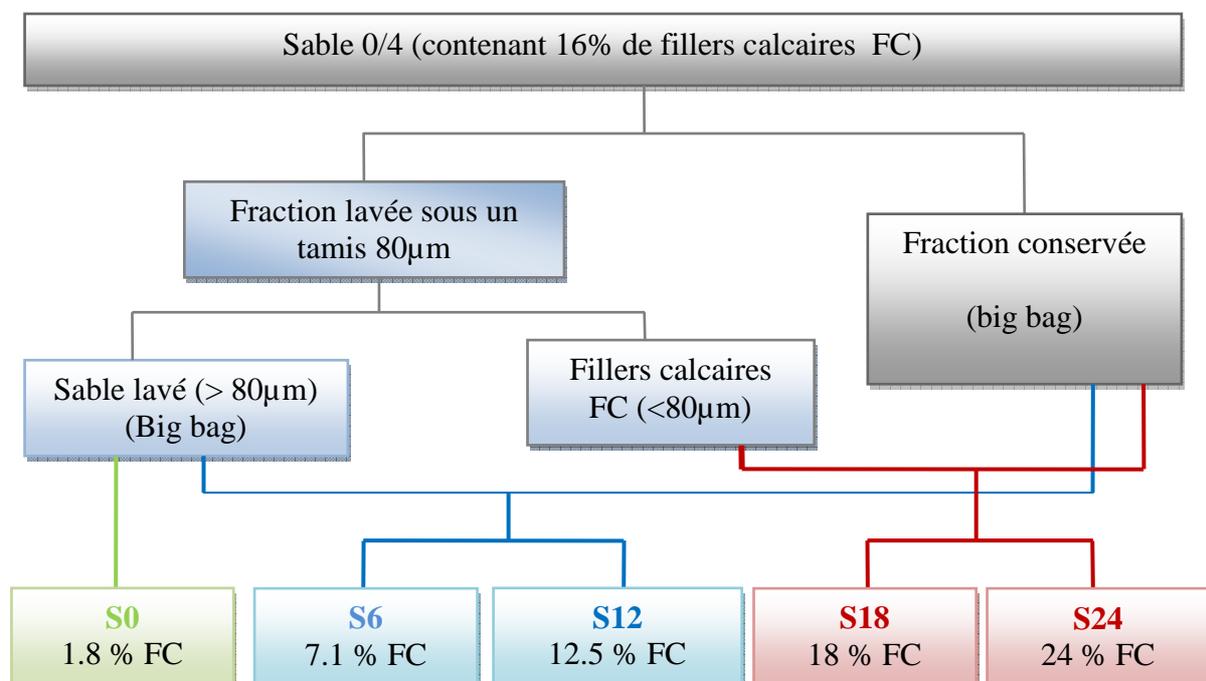


Fig. 3.13 : Diagramme de fabrication des sables à différents taux de fillers

Il s'agit de :

- **S0** est un sable propre, constitué de la seule fraction grenue du sable lavé
- **S6** et **S12** ont été reconstitués par mélange du sable lavé et du sable initial,
- **S18** et **S24** ont été obtenus par mélange du sable initial et des fillers calcaires FC.

La Fig. 3.14 indique les différents pourcentages des constituants permettant d'obtenir les sables désirés.

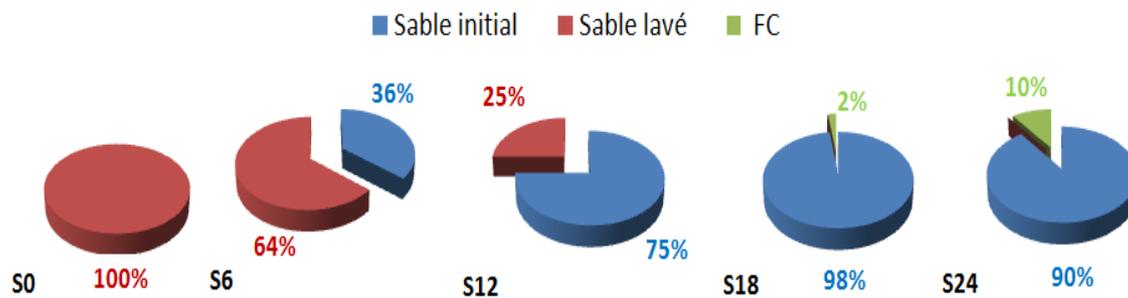


Fig. 3.14 : Constituants des sables fabriqués (%)

Par ailleurs, le spectre de teneur en fines de ces sables dépasse la valeur de 15 % souvent désignée dans la littérature comme limite haute pour un usage dans les bétons. Il couvre aussi la gamme des diverses catégories de teneur en fines des sables associées aux spécifications normatives des granulats à bétons ([Norme NF EN 12620, 2000] "Granulats pour béton" ou la norme similaire [Norme NT 21.30, 2002]) qui définissent cinq catégories de teneur en fines des sables. D'après ces normes, nos sables S0, S6, S12, S18 et S24 correspondent respectivement aux cinq catégories suivantes: f_3 , f_{10} , f_{16} , f_{22} et f_{Dec} , comme le montre le Tab. 3.3.

Sables fabriqués		NF EN 12620 ou NT 21.30				
		Dimensions	Granularité		Teneur en fines	
Si	Passant à 63 μ m		Passant à D	Catégorie	Categories	Passant à 63 μ m
S0	1,6	D=4mm et d=0	85 à 99	G_{F85}	f_3	≤ 3
S6	6,3				f_{10}	≤ 10
S12	14,2				f_{16}	≤ 16
S18	16,2				f_{22}	≤ 22
S24	22				f_{Dec}	≥ 22

Tab. 3.3 : Catégories des sables selon la norme NF EN 12620

Notons que l'article 10 de la norme française équivalente [XP P 18-545, 2008], distingue quatre niveaux de qualité des sables (A, B, C, D) intégrant notamment la teneur en fines (f_A , f_B , f_C , f_D). Ces spécifications sont mentionnées dans le Tab. 3.4. Le choix des granulats à béton se fait alors à partir du référentiel représenté par le Tab. 3.5.

Ainsi, par exemple, pour des bétons placés en environnements agressifs, seuls les granulats de catégorie A sont admis (teneur en fines des sables $\leq 10\%$). Pour les bétons courants, les matériaux allant jusqu'à la catégorie C peuvent être utilisés a priori (teneur en fines des sables $\leq 16\%$).

NF XP P 18-545 – Article 10					
Granularité		Teneur en fines		Propreté	
Passant à D	Code	Passant à 63 μm	Code	MB*	Code
85 à 99	Gr _A	≤ 10	f_A	$\leq 1,5$	P _A à P _D
	à Gr _D	≤ 16	f_B et f_C		
		≤ 22	f_D		

Tab. 3.4 : Spécification des sables, selon la norme NF XP P 18-545 – Article 10

Utilisation	Indice des caractéristiques des granulats selon NF XP P 18-545			
	A	B	C	D
Environnements agressifs (XF4, XA3*)	Oui	Oui si Ab _A	Non	
Bétons Bâtiment et OA de $f_{c_{cyl}} > 35$ MPa	Oui	Oui pour certaines caractéristiques	Maxi deux cara. indicées C ou D après étude ou référence	
Béton courant	Oui			Maxi deux cara. indicées D

* EN 206-1 : XF4 gel en présence d'eau avec agent de déverglaçage ou eau de mer ; XA3 environnement à forte agressivité chimique

Tab. 3.5 : Choix des granulats à béton selon NF XP P 18-545

Notons par ailleurs, que la norme EN 206-1 des bétons admet, dans son application française [NF EN 206-1, 2004], que les fillers calcaires déclarés "actifs" [NF P 18-508, 1995], puissent être considérés en tant qu'addition. Dans ce cas, en présence d'une quantité C de

ciment CEM I 42,5 ou 52,5 N ou R, ces fillers peuvent être comptés dans le liant équivalent L en affectant à la quantité A prise en compte un coefficient d'activité k égal à 0,25, soit $L=C+0,25.A$. Le rapport maximum $A/(A+C)$ pouvant être pris en compte dans le liant équivalent dépend de la classe d'exposition du béton. Par exemple, le liant équivalent d'un béton placé dans un environnement sans risque d'attaque ou de corrosion des armatures ($X0^1$) peut compter jusqu'à 25% de fillers calcaires. En milieu exposé à l'eau de mer ($XS1, 2, 3$) ou au gel avec sel de déverglaçage ($XF4$), cette teneur passe à 5%. Elle est nulle pour les bétons soumis à des attaques chimiques ($XA1, 2, 3$).

L'emploi de sables concassés ayant un taux de fillers supérieur à ceux utilisés habituellement dans les mélanges hydrauliques n'est pas interdit mais doit être démontré à l'issue d'une démarche performantielle.

3.4 Caractérisation des propriétés

3.4.1 Granulats

3.4.1.1 Granularité

La granularité du sable originel S0/4, du sable lavé S0 et des deux gravillons G4/8 et G10/20 a été mesurée par tamisage par voie humide pour les fractions supérieures à 80 μm selon la norme [NF EN 933-1,1997]. Celle des fillers calcaires FC et du ciment CEM I a été obtenue par analyse granulométrique laser. La granulométrie des sables reconstitués (S6, S12, S18 et S24) a été calculée en tenant compte de la granulométrie des deux fractions mélangées (sable lavé + sable d'origine ou sable d'origine + fillers calcaires) et de leur pourcentage respectifs dans les mélanges (voir Fig. 3.15). Les pourcentages des passants des différents matériaux sont donnés dans le Tab. 3.6. Les différentes courbes granulométriques sont représentées par la Fig. 3.15.

¹ Classes d'exposition selon EN 206-1

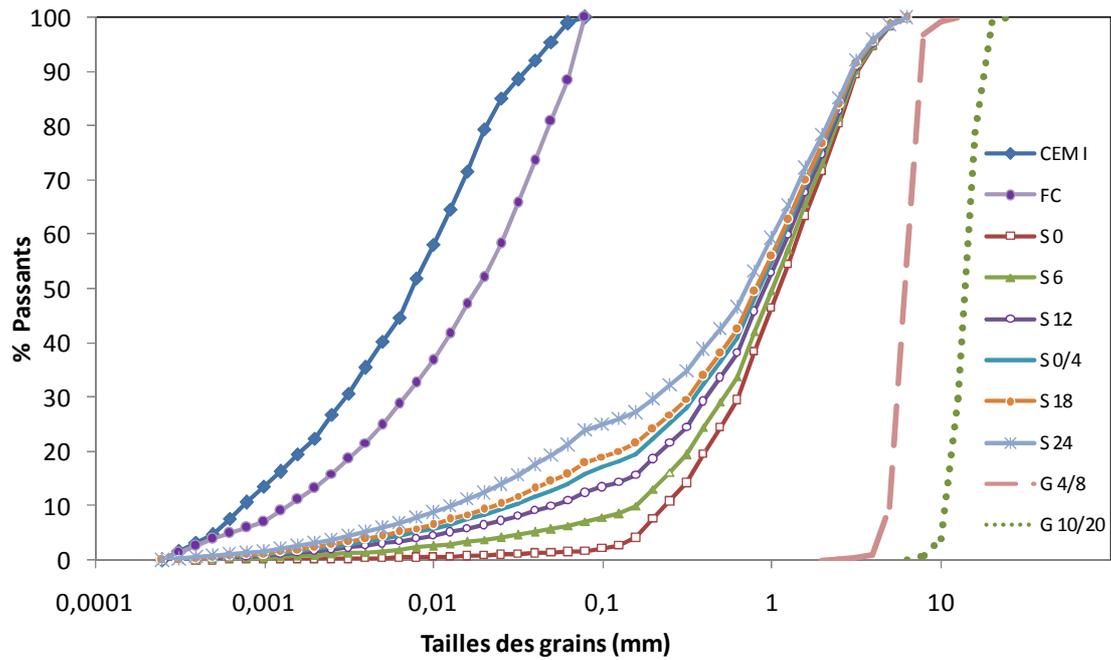


Fig. 3.15 : Granularité des matériaux - Courbes

Taille (mm)	S0	S 6	S 12	S 16	S 18	S 24	FC	CEM I	4/8	10/20
0,00025		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0		
0,00031		0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	1,3	1,6		
0,00040	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	2,7	3,2		
0,00050	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	1,0	4	4,7		
0,00063	0,1	0,4	0,6	0,8	0,9	1,2	5	7,7		
0,0008	0,1	0,4	0,8	1,0	1,1	1,5	6,1	10,7		
0,00100	0,1	0,5	0,9	1,1	1,3	1,7	7,1	13,6		
0,00125	0,2	0,6	1,1	1,5	1,6	2,2	9,1	16,4		
0,0016	0,2	0,8	1,4	1,8	2,0	2,7	11,3	19,6		
0,0020	0,2	0,9	1,7	2,1	2,4	3,2	13,3	22,5		
0,0025	0,3	1,1	2,0	2,6	2,9	3,8	16	26,8		
0,00315	0,3	1,3	2,3	3,0	3,4	4,5	18,8	30,8		
0,0040	0,4	1,5	2,7	3,5	3,9	5,2	21,7	35,5		
0,0050	0,5	1,8	3,1	4,0	4,5	6,0	25	40,4		
0,0063	0,5	2,1	3,6	4,6	5,2	6,9	28,9	44,7		
0,008	0,6	2,3	4,1	5,2	5,9	7,9	32,8	52		
0,0100	0,7	2,6	4,6	5,9	6,6	8,9	36,9	58,2		
0,0125	0,8	3,0	5,2	6,7	7,5	10,0	41,8	64,6		
0,016	0,8	3,4	5,9	7,6	8,5	11,3	47,2	71,7		
0,020	0,9	3,7	6,5	8,3	9,4	12,5	52,1	79,5		
0,025	1,0	4,2	7,3	9,3	10,5	14,0	58,3	85,2		
0,0315	1,2	4,7	8,2	10,5	11,8	15,8	65,8	88,6		
0,040	1,3	5,2	9,2	11,8	13,2	17,7	73,6	92,2		
0,050	1,5	5,8	10,1	12,9	14,6	19,4	80,9	95,5		
0,063	1,6	6,3	11,0	14,2	16,2	22	88,5	99		
0,08	1,8	7,1	12,5	16,0	18,0	24,0	100	100	1,5	1,2
0,100	2,3	7,9	13,5	17,2	19,1	25,0	100	100		
0,125	2,7	8,6	14,4	18,3	20,2	26,0	100	100		
0,16	4,2	10,0	15,8	19,6	21,5	27,2	100	100		
0,20	7,6	13,2	18,7	22,4	24,2	29,7	100	100		
0,25	10,9	16,3	21,6	25,2	26,9	32,3	100	100		
0,315	14,3	19,4	24,6	28,0	29,7	34,9	100	100		
0,40	19,6	24,4	29,3	32,5	34,1	38,9	100	100		

0,50	24,6	29,1	33,7	36,7	38,2	42,7	100	100		
0,63	29,6	33,9	38,2	41,1	42,5	46,7	100	100		
0,8	38,5	42,2	45,9	48,3	49,6	53,3	100	100		
1,00	46,5	49,7	53,0	55,1	56,1	59,4	100	100		
1,25	54,6	57,3	60,0	61,8	62,8	65,5	100	100		
1,6	63,5	65,7	67,9	69,3	70,1	72,3	100	100		
2,0	71,6	73,3	74,9	76,0	76,7	78,4	100	100		
2,5	80,5	81,7	82,8	83,6	84,0	85,2	100	100	2,2	
3,15	89,7	90,3	91,0	91,4	91,6	92,2	100	100	2,5	
4	94,7	95,0	95,3	95,5	95,6	96,0	100	100	3,1	
5	98,5	98,6	98,7	98,7	98,8	98,6	100	100	11,7	
6,3	100	100	100	100	100	100	100	100	55,2	
8	100	100	100	100	100	100	100	100	96,9	1,7
10	100	100	100	100	100	100	100	100	99,3	4,7
12,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	30,5
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	79,2
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99
25	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 3.6 : Granularité des matériaux – Passants aux différents tamis

Le module de finesse du sable d'origine et des différents sables fabriqués, ainsi que leurs taux de fines respectifs, sont résumés dans le Tab. 3.7.

Sable	S0	S6	S12	S 0/4	S18	S24
Pourcentage de fines (< 80µm)	1,8	7,13	12,5	16	18	24
Module de finesse (MF)	3,18	2,99	2,80	2,67	2,61	2,42

Tab. 3.7 : Caractéristiques des différents sables

Les sables S12, S0/4, S18 et S24 présentent un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8. Ils sont donc classés parmi les bons sables à bétons selon la norme [NT 21.30, 2002]. Les sables S0 et S6 ont un module de finesse compris entre 2,8 et 3,2. Ces derniers sont plus grossiers car ils contiennent peu de fines...

Le taux de fines des gravillons 4/8 et 10/20 est respectivement de 1,5% et 1,2% (Tab. 3.6). La teneur maximale de fines des gravillons à béton est limitée à 2% selon la norme tunisienne [NT 21.25, 1990]. Les spécifications normatives sont ainsi respectées pour ces deux gravillons. Ces fines ont été comptabilisées dans les mélanges.

3.4.1.2 Propriétés physiques

Les propriétés usuelles des granulats ont été mesurées selon les normes tunisiennes. Elles comprennent :

- La masse volumique en vrac, notée MV_{vrac} et définie comme étant la masse de l'unité de volume apparent du granulat constitué par le volume de la matière et de tous les vides présents. Cet essai a été réalisé selon la norme [NT 21.127, 1990].
- La masse volumique absolue, notée MVA, est égale à la masse de l'unité de volume absolu du granulat constitué uniquement par le volume de la matière sans tenir compte du volume de toute forme de vides. Elle est déterminée au pycnomètre selon les spécifications de la norme [NT 21.94, 1990].
- La masse volumique réelle MVR est la masse de l'unité de volume réel du granulat, c'est-à-dire du volume constitué par la matière sans tenir compte du volume des vides intergranulaires. L'essai est réalisé selon les normes spécifiques aux gravillons [NT 21.04, 1984] et aux sables [NT 21.05, 1984].
- Le coefficient d'absorption d'eau Ab des granulats est défini par le rapport entre l'augmentation de masse de l'échantillon, provoquée après 24 heures d'immersion dans l'eau, et la masse de matériau sec. De même, cet essai est réalisé selon les normes spécifiques aux gravillons [NT 21.04, 1984] et aux sables [NT 21.05, 1984].
- L'équivalent du sable ES qui permet d'apprécier la propreté du matériau. Il a été mesuré selon la norme [NT 21.26, 1990].
- L'essai au bleu de méthylène du sable MB réalisé selon la norme [NF P 18-592, 1990]. Le principe de cet essai est de déterminer la capacité d'adsorption des fines actives par fixation du bleu de méthylène.

Les résultats de ces essais sont groupés dans le Tab. 3.8.

Matériaux	MV_{vrac} (Kg/m ³)	MVA (Kg/m ³)	MVR (Kg/m ³)	Ab (%)	ES	MB (g/100g)
Sable 0/4	1695	2720	2690	0,3	67,27	1,03
Gravillon 4/8	1360	2710	2687	0,3	-	-
Gravillon 10/20	1390	2710	2685	0,3	-	-

Tab. 3.8 : Propriétés physiques des matériaux

On remarque que :

- La masse volumique absolue obtenue nous confirme la nature calcaire des granulats par sa valeur voisine de celle de la calcite, soit 2,715 kg/m³.

- Les masses volumiques réelles sont presque égales entre elles. La valeur la plus élevée est celle de la plus petite coupure (sable 0/4), tandis que la plus faible est celle du gravillon 10/20.
- La masse volumique en vrac est plus élevée pour le sable et elle est presque égale pour les deux gravillons.
- Le coefficient d'absorption d'eau est très faible pour des granulats calcaires, ce qui indique une faible porosité intragranulaire de ce matériau (sans doute partiellement métamorphisé). Les valeurs sont conformes aux spécifications de la norme [NT 21.30, 2002], qui préconise une absorption d'eau maximale de 5 % pour les granulats à bétons. Les quantités d'eau absorbées par les granulats seront prises en compte dans les formules de béton de manière à maîtriser l'eau efficace.
- La valeur de l'équivalent de sable du sable 0/4 respecte les spécifications des sables à bétons de la norme [NT 21.30, 2002], qui doit être supérieure à 60 pour les sables concassés à usage dans des bétons de qualité courante.
- La valeur de bleu du sable est admissible selon la limite exigée par la norme [NT 21.30, 2002] et qui est de 1,0 g de bleu pour 100 g de fines.

3.4.1.3 Propriétés mécaniques

La caractérisation mécanique des granulats a été déterminée à partir de l'essai de fragmentation au choc selon la norme [NF P18-573, 1990] afin de s'assurer de la dureté des matériaux. La classe granulaire du matériau soumis à l'essai est 6,3/10. Elle est extraite par tamisage du gravillon G 10/20.

La résistance au choc Los Angeles (LA) des granulats, mesurée selon la norme [NF P18-573, 1990] sur la classe 6,3/10 extraite du gravillon G 10/20 est égale à 22. Cette valeur est inférieure à la valeur spécifiée par la norme [NT 21.30, 2002], qui préconise une valeur limite supérieure (V_{ss}) de 40 pour les granulats destinés à la confection de bétons courants.

Selon la norme [EN 12620, 2000], les gravillons appartiennent à la catégorie LA₂₅.

3.4.1.4 Propriétés chimiques et minéralogiques

Analyse chimique

L'analyse chimique des granulats a été déterminée par fluorescence X. La perte au feu sert à déterminer la perte de masse liée au départ de tous les éléments volatils de la roche (eau résiduelle des argiles, décarbonation du calcaire, etc.). Elle résulte de l'échauffement de l'échantillon à haute température (1 100°C). La perte au feu PAF s'exprime en % à partir de la relation :

$$PAF = \frac{M_i - M}{M_i} \times 100 \quad (\text{Rel.3.1})$$

Avec :

M_i : masse avant chauffage

M : masse après chauffage

La composition chimique obtenue est donnée par le Tab. 3.9.

Compound Formula	PAF	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Total
Concentration (% massique)	42,31	0,049	0,436	0,03	0,43	0,019	0,19	0,00	54,89	0,009	0,509	0,523	0,015	99,4

Tab. 3.9 : Composition chimique du calcaire Jbel Ressas

L'analyse chimique des granulats a montré que le constituant prédominant est l'oxyde de calcium CaO (chaux) avec une concentration massique de 54,89 %. Tous les autres éléments présents sont en très faibles quantité, notamment MgO et SiO₂. Compte tenu de la perte au feu, la roche peu être qualifiée de calcaire quasiment pur.

Cette analyse a montré aussi que les granulats de l'étude ne contiennent pas de matières nuisibles à la fabrication des bétons hydrauliques.

Analyse minéralogique par diffraction X

La diffraction des rayons X, notée DRX, permet de caractériser les phases minéralogiques et de préciser autant que possible la nature des structures cristallines. Le résultat de l'analyse par DRX est un spectre d'énergie du faisceau diffracté en fonction de l'angle de diffraction 2θ. Le diffractogramme obtenu pour le calcaire de Jbel Ressas est représenté Fig. 3.16.

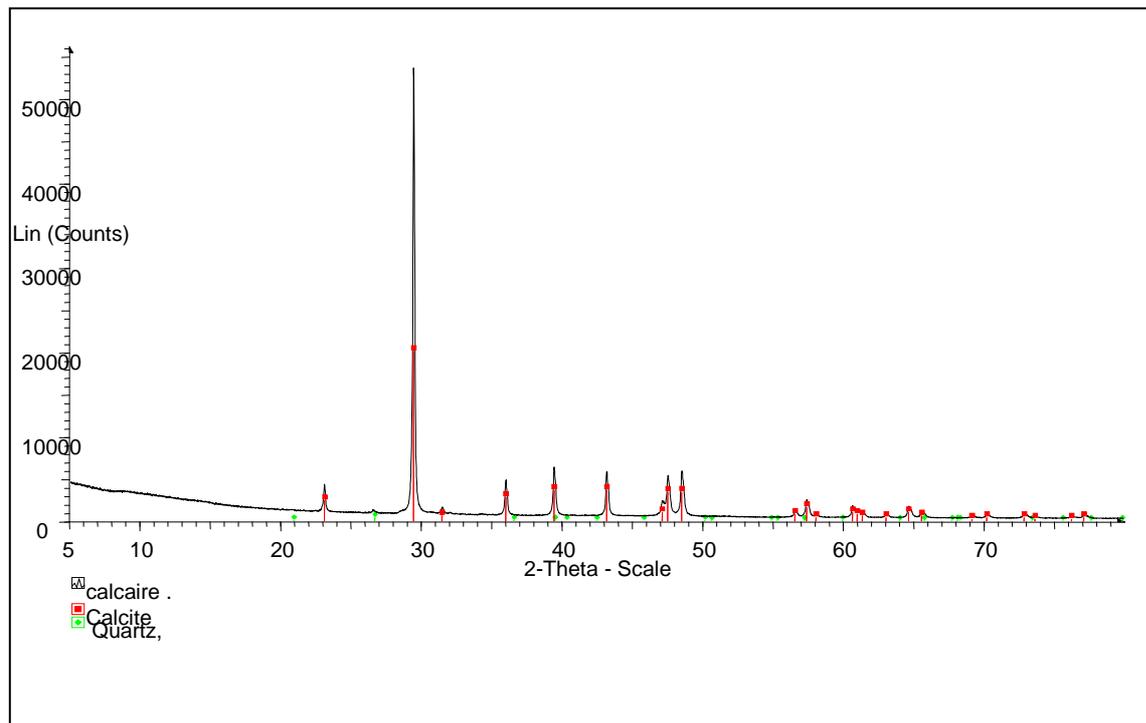


Fig. 3.16 : Diffractogramme du calcaire de Jbel Ressas

L'analyse du diffractogramme des granulats calcaires étudiés révèle la présence des minéraux suivants : calcite CaCO_3 quasi exclusivement et quartz SiO_2 en trace.

3.4.1.5 Propriétés spécifiques à l'utilisation de BétonlabPro2 : Compacité des granulats

La compacité des coupures supérieures à $80\ \mu\text{m}$ (dépourvus de fillers) est mesurée à sec sur granulats lavés selon le mode opératoire suivant :

L'échantillon de masse sèche M_s (en Kg) est déposé dans un cylindre métallique de diamètre \varnothing (en m) fixé à une table vibrante et fermé par un piston exerçant une contrainte de 10 KPa transmise par un piston plat. Cet échantillon est soumis à une vibration de 50 Hz pendant deux minutes. La hauteur finale H (en m) de l'échantillon compacté est alors mesurée en deux points diamétralement opposés. L'indice de serrage K (voir plus loin) associé à ce procédé est égal à 9. Le dispositif de l'expérience est schématisé par la Fig. 3.17.

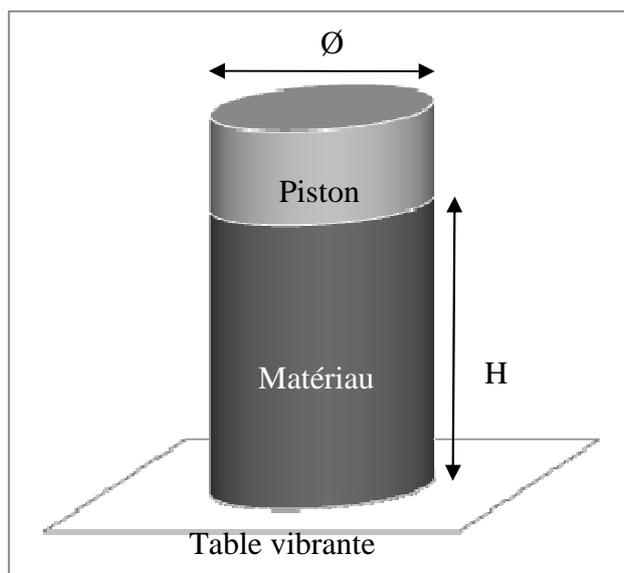


Fig. 3.17 : Dispositif de mesure de la compacité Φ des fractions grenues

Pour les fractions comprises entre 80 μm et 5 mm, les compacités ont été mesurées sur des échantillons secs de masse M_s de 3 Kg. Pour les fractions supérieures à 5 mm, la masse M_s des échantillons était de 7 Kg.

La compacité Φ est donnée par la moyenne (sur un minimum de deux mesures) de l'expression suivante (Rel. 3.2) :

$$\Phi = \frac{M_s}{MVR \cdot V} \quad (\text{Rel.3.2})$$

Avec :

- MVR la masse volumique réelle du matériau (en Kg/m^3) ;
- V le volume total de l'échantillon compacté en m^3 .

Ces compacités Φ permettent alors au logiciel de calculer les compacités virtuelles β_i des classes élémentaires en considérant un indice de serrage K égal à 9 [de Larrard, 2000]. Ces compacités β_i sont considérées uniformes sur l'étendue de la classe. L'effet de paroi du moule est pris en compte par le logiciel à partir des dimensions de l'échantillon. Le Tab. 3.10 donne les valeurs de compacités mesurées Φ et les compacités virtuelles β_i pour chaque coupure.

Matériaux	S 0/4	G 4/8	G 10/20
Φ	0,699	0,624	0,593

β_i	0,604	0,684	0,669
-----------	-------	-------	-------

Tab. 3.10 : Compacités réelles Φ et compacités virtuelles β_i des fractions $> 80\mu\text{m}$

On constate que la compacité expérimentale Φ du sable est supérieure à celle des deux gravillons. La compacité du petit gravillon (G 4/8) est supérieure à celle du gravillon plus gros (G10/20). On constate ainsi que la compacité expérimentale Φ dépend de la classe granulaire, de l'étendue granulaire et de l'effet de paroi qui est plus important pour les gros grains. En revanche, la compacité virtuelle β_i des granulats tend à augmenter avec la taille des grains.

3.4.2 Fillers calcaires

3.4.2.1 Propriétés usuelles

La granulométrie des fillers calcaires a été déterminée par granulométrie laser. Elle est donnée dans le Tab. 3.6 et sur la Fig. 3.15. Elle a été associée à chaque fraction sableuse.

3.4.2.2 Propriétés physiques

En première approximation, la masse volumique réelle des fillers calcaires et leur absorption d'eau ont été prises égales à celles de la fraction grenue du sable 0/4. Par ailleurs, leur surface spécifique Blaine (S_{FI}) a été estimée à partir de leur granularité et de leur masse volumique, en assimilant les grains à des sphères. Les valeurs obtenues complètent le Tab. 3.11.

Ab (%)	S_{FI} (m ² /kg)	MRV (kg/m ³)
0,3	310	2690

Tab.3.11 : Caractéristiques des fillers calcaires

3.4.2.3 Propriétés chimiques et minéralogiques

Analyse chimique

L'analyse chimique des fillers calcaires est représentée par le Tab. 3.12. Elle montre que ce produit est constitué majoritairement d'oxyde de calcium CaO avec une concentration massique de 51,8 %. Contrairement aux granulats, on détecte un peu plus de MgO, de SiO₂ et

d'Al₂O₃ sans doute associés à la présence d'une fraction argileuse (voir valeur de bleu Tab. 3.8) provenant des pollutions diaclasiques.

Compound Formula	PAF	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Total
Concentration (% massique)	42,72	0,058	1,917	0,535	2,06	0,03	0,21	0,05	51,8	0,036	0,020	0,076	0,01	99,57

Tab. 3.12 : Composition chimique des fillers calcaires issus du sable 0/4 de Jbel Ressas

Analyse minéralogique par diffraction X

Le diffractogramme de rayons X (DRX) des fillers calcaires de Jbel Ressas est présentée Fig. 3.18. Il révèle la présence des mêmes minéraux que dans les granulats - calcite CaCO₃ et quartz SiO₂ (en plus grande quantité relative cependant) - avec aussi un peu de dolomite CaMg(CO₃)₂.

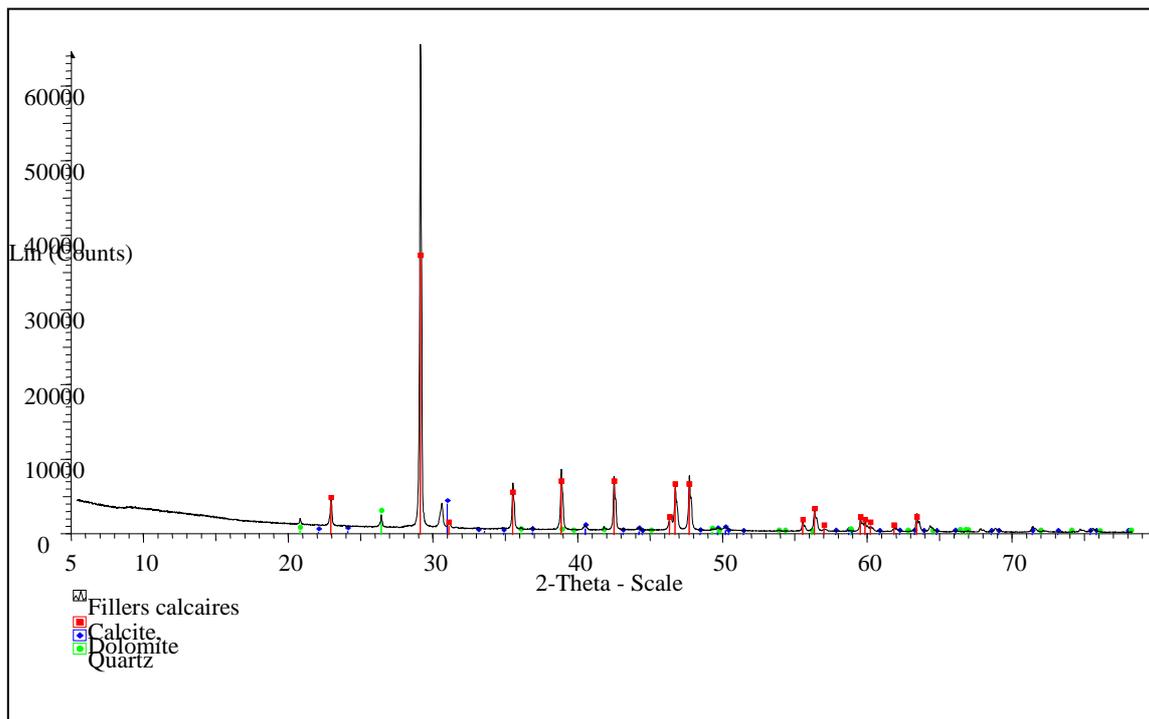


Fig. 3.18 : Diffractogramme des fillers calcaires de Jbel Ressas

3.4.2.4 Propriétés spécifiques à l'utilisation de BetonlabPro2

Compacité des fillers calcaires

Elle est mesurée selon un protocole expérimental différent de celui des fractions grenues. Il s'agit d'un essai de demande en eau où la compacité est déduite de la masse d'eau nécessaire pour atteindre la consistance normale, telle que mesurée avec la sonde de Vicat [Lecomte *et al*, 2009]). L'indice de serrage K associé à cet essai est égal à 4.8. La compacité Φ est calculée selon la relation suivante :

$$\Phi = \frac{1}{1 + \left[\rho_C \times \left(\frac{C}{C + FC} \right) + \rho_{FC} \times \left(1 - \frac{C}{C + FC} \right) \right] \times \left(\frac{E}{C + FC} \right)} \quad (\text{Rel. 3.3})$$

Avec

- $\frac{C}{C + FC}$ est le rapport entre le pourcentage de ciment C dans le mélange et celui des fillers calcaires FC.
- ρ_C et ρ_{FC} sont respectivement la masse volumique réelle du ciment et des fillers calcaires.
- E est la quantité d'eau.

Pour les fillers calcaires, le principe de la méthode consiste à repérer le rapport E/(C+FC) qui conduit à la consistance normale, d'abord en présence 10% de ciment et 90% de fillers, puis en présence de 20% de ciment et 80% de fillers. Les compacités Φ correspondantes sont ensuite extrapolées pour trouver la compacité Φ_{FC} des fillers seuls. Les valeurs obtenues sont représentées par la Fig. 3.19. La valeur de Φ_{FC} est donnée dans le Tab. 3.13.

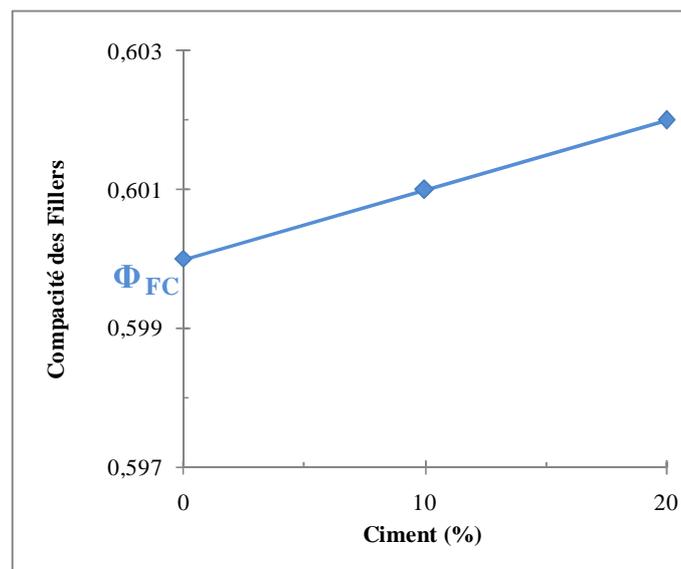


Fig. 3.19 : Compacité des fillers avec différents pourcentages de ciment

Dosage de saturation en superplastifiant

Le dosage de saturation en superplastifiant, pour un ciment ou un fillers, correspond à la dose à partir de laquelle l'adjuvant atteint son effet optimal. Les propriétés du superplastifiant utilisé dans ces travaux sont présentées plus loin.

La recherche de la dose de saturation en superplastifiant des fillers calcaires a été réalisée sur des pâtes normales contenant 10 % de ciment et 90% de FC, selon le principe de la sonde de consistance [Lecomte *et al*, 2009]. La méthode consiste à rechercher la quantité d'eau qui conduit à la consistance normale de pâtes contenant un dosage croissant de superplastifiant SP. La dose de saturation du ciment (voir plus loin) est prise en compte à ce stade. Le calcul de la compacité Φ de chaque pâte normale (Rel. 3.3) permet de tracer la courbe $\Phi=f(\text{SP}/\text{FC})$ (la compacité Φ augmente avec la diminution de la quantité d'eau permise par la présence du SP). L'ajustement d'une fonction parabolique permet de déterminer le dosage de saturation des fillers calcaires X_{FC} qui correspond arbitrairement au rapport SP/FC qui procure 90% d'accroissement maximum de la compacité (sommet de la parabole), comme le montre la Fig. 3.20. La compacité correspondante Φ^*_{FC} est celle des fillers calcaires avec SP à saturation. Φ^*_{FC} est égale à 0.691.

Un exemple de calcul pour la réalisation des pâtes de consistance normale à différentes teneurs en SP est présenté Tab. 3.13.

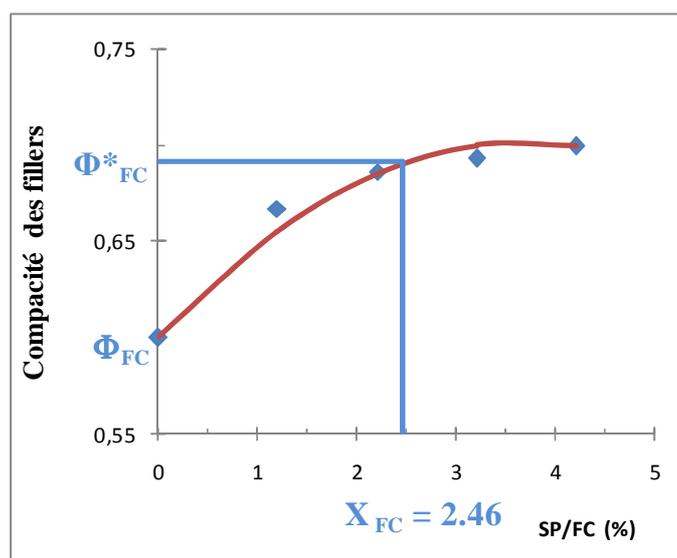


Fig. 3.20 : Compacité des fillers avec différents pourcentages de SP

SP/FC (%)	0	1,2	2,2	3,2	4,2	5,2

SP/C (%)	0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
C (g)	43,94	51,54	52,79	53,09	53,35	53,94
FC (g)	342,09	401,23	410,99	413,27	415,29	419,86
SP (g)	0	5,82	10,07	14,26	18,48	22,88
E (ml)	98,15	83,99	76,08	71,21	66,41	60,43
E/C	2,132	1,606	1,472	1,426	1,383	1,313
E/FC	0,27	0,21	0,19	0,18	0,18	0,17
E/(C+FC)	0,243	0,183	0,168	0,162	0,157	0,149
Φ_{FC}	0,601	-	-	-	-	-
Φ^*	-	0,667	0,686	0,693	0,699	0,710
Dose de saturation (%)	2.46					
Φ^*_{FC}	0.691					

Tab. 3.13 : Dosage des pâtes normales réalisées et compacités des fillers calcaires

3.4.3 Ciment

3.4.3.1 Propriétés usuelles

Le ciment fourni par la cimenterie est un CEM I 42,5 N. Sa granulométrie laser est donnée Tab. 3.6 et représentée par la Fig. 3.15.

3.4.3.2 Propriétés physiques

Les propriétés physiques du ciment ont été communiquées par la cimenterie. Elles sont données dans le Tab.3.14.

MVR (g/cm ²)	3110
Finesse SSB (cm ² /g)	3213
Début de prise (mn)	224
Fin de prise (mn)	334
Résidu 90 μ (%)	1,64
Résidu 63 μ (%)	5,26
Eau de gâchage (%)	23,4

Tab. 3.14 : Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42,5 N

3.4.3.3 Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques du ciment sont mesurées sur des mortiers normalisés selon la norme [NT 47.30, 1991].

Les classes vraies du ciment dans le temps ont été communiquées par la cimenterie CAT-COLACEM aux échéances 1, 3, 7 et 28 jours. Elles ont été vérifiées expérimentalement à toutes les échéances sur des éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm conformément à la norme [NT 47.30, 1991]. La résistance à la traction par flexion R_t a été déterminée en premier sur ces éprouvettes. Les demi-prismes, de chaque éprouvette, obtenus après rupture en flexion sont ensuite rompus en compression.

Les différentes valeurs de résistances à la compression mesurées par la cimenterie et celles trouvées expérimentalement complètent le Tab. 3.15. On remarque qu'il ya une bonne concordance pour les mesures à 1 jour et à 3 jours. En revanche, les résistances mesurées aux autres échéances sont inférieures à celles annoncées, notamment à 28 jours...

Age (j)	Classe vraie Annoncée (MPa)	Classe vraie expérimentale (MPa)	R_t (MPa)
1	8,1	8,14	2,27
3	24,8	21,75	4,8
7	41,92	34,18	7,46
14	-	45,25	9,3
28	59,11	52,83	9,6

Tab. 3.15 : Caractéristiques mécanique du CEM I 42.5 N

3.4.3.4 Propriétés chimiques et minéralogiques

Analyse chimique

La composition chimique fluorescence X du ciment est donnée dans le Tab. 3.16:

Compound Formula	PAF	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Total
Concentration (% massique)	2,58	0,204	1,344	3,389	20,49	0,25	2,51	0,38	63,6	0,196	0,301	4,757	0,12	100,1

Tab. 3.16 : Composition du CEM I 42.5 N

Ciment		Clinker	
Constituant	Taux (%)	Constituant	Taux (%)
Clinker	95,4	C ₃ S - Hatrurite: Ca ₃ SiO ₅	73

Fillers calcaires	1,6	C ₂ S - Larnite: Ca ₂ (SiO ₄)	6,3
Gypse	3	C ₃ A - Ca ₃ Al ₂ O ₆	2,2
		C ₄ AF - Brownmillerite: Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	13,5

Tab. 3.17 : Composition de Bogue du CEM I 42.5 N

L'utilisation de ces données a permis de déterminer le pourcentage théorique des principaux constituants du ciment par application des formules de Bogue [Baron et al, 1996]. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tab. 3.17. On notera que les teneurs en C₂S et C₃A sont particulièrement faibles...

Analyse minéralogique par diffraction X

Le cliché DRX du ciment est présenté Fig. 3.21. L'analyse quantitative Rievelt associée réalisée par la cimenterie a donné les résultats suivants :

- 50%, Hatrurite: Ca₃SiO₅ ;
- 10.42%, Larnite: Ca₂(SiO₄) ;
- 8.33%, Calcium aluminum Oxide: Ca₃Al₂O₆ ;
- 20.83%, Brownmillerite: Ca₂(Al,Fe)₂O₅ ;
- 4.17%, Calcium sulfate: Ca(SO₄) ;
- 6.25%, Calcium sulfate Hydrate: Ca(SO₄)(H₂O).

Les teneurs obtenues sont significativement différentes de celles déduites de l'analyse chimique. Ces différences sont dues principalement à la présence d'impuretés qui modifie la cristallinité des différentes phases, comparée à leur formation théorique.

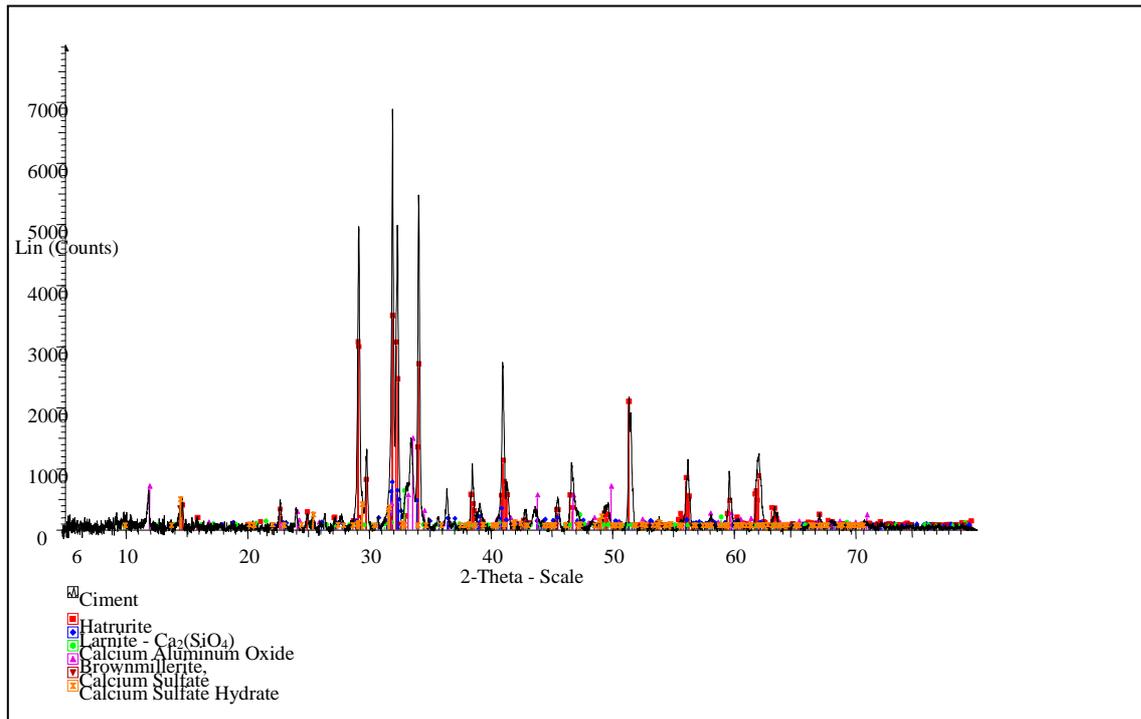


Fig. 3.21 : Analyse chimique du CEM I 42,5 N

3.4.3.5 Propriétés spécifiques :

Compacité sur pâte normale

Comme pour les fillers, la compacité du ciment, sans superplastifiant, a été mesurée sur pâte normale par des essais de consistance avec la sonde de Vicat [Lecomte *et al*, 2009]. Le principe consiste à repérer le rapport massique E/C qui conduit à la consistance normale, puis à calculer la compacité Φ_C correspondante en considérant que le volume des vides est égal au volume d'eau utilisé.

$$\Phi = \frac{1}{1 + \rho_c \frac{E}{C}} \quad (\text{Rel. 3.3})$$

Avec ρ_c est la masse volumique réelle du ciment. E et C sont respectivement la quantité d'eau et la quantité du ciment.

La compacité du ciment ainsi trouvée est donnée dans le Tab. 3.18.

Dosage de saturation en SP

La recherche de la dose de saturation en SP a été réalisée sur des pâtes selon la même technique utilisée pour les fillers calcaires [Lecomte *et al*, 2009]. Il s'agit, tout d'abord, de rechercher la consistance normale de pâtes contenant un pourcentage croissant de SP. Ensuite, en ajustant une branche parabolique à la fonction $\Phi=f(\text{SP}/C)$, on cherche le dosage de saturation (X_C) qui correspond au rapport SP/C qui procure 90% de l'accroissement de la compacité. Le résultat est présenté Fig. 3.22. Le dosage de saturation de ciment est égal à 2,3 % de SP.

Le dosage des pâtes réalisées est donné dans le Tab. 3.18. La compacité Φ^*_C est celle du ciment avec SP à saturation. Elle est égale à 0.644. Les valeurs de compacités du ciment, avec SP, complètent le Tab. 3.18.

SP (%)	0	1	2	3	4	5
Ciment (g)	445,97	475,83	490,52	492,23	494,51	492,27
SP (g)	0	4,76	9,81	14,77	19,78	24,61
Eau (ml)	106,6	92,51	83,01	77,78	72,32	68,47
E/C	0,239	0,201	0,183	0,179	0,174	
Φ_C	0,574	-	-	-	-	
Φ^*	-	0,615	0,637	0,643	0,649	0,649
Dosage de saturation (%)	2,3					
Φ^*_C	0,644					

Tab. 3.18 : Dosage des pâtes réalisés et compacités du CEM I 42.5 N

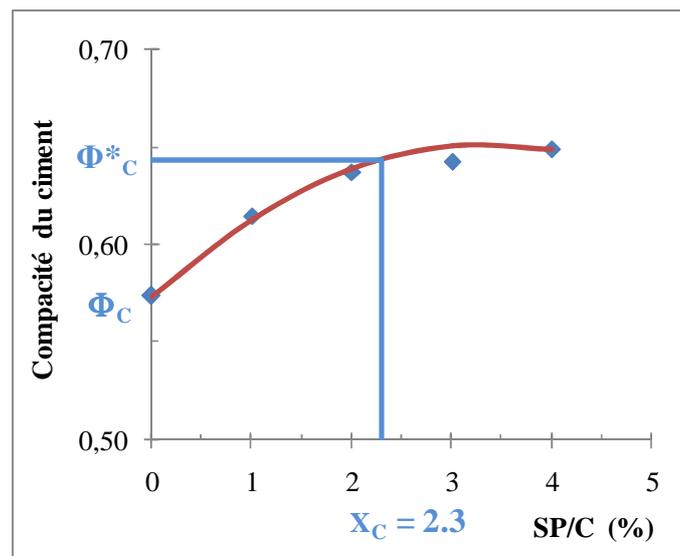


Fig. 3.22 : Compacité du ciment en fonction du pourcentage de SP

3.4.4 Superplastifiant

Comme déjà signalé, le superplastifiant choisi pour l'étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau de type polycarboxylate commercialisé sous le nom de SIKA VISCOCRETE TEMPO 12. C'est un superplastifiant puissant réputé conférer aux bétons :

- Une longue tenue rhéologique, supérieure à 2h ;
- Une robustesse vis-à-vis de la ségrégation ;
- Une bonne qualité de parement.

Les principales propriétés mesurées sur le superplastifiant sont résumées dans le Tab. 3.19.

Propriétés	Valeur
MVR SP (Kg/m ³)	1060
Teneur en eau w (%)	224
Extrait sec ES (%)	30,9
MVR ES (Kg/m ³)	1224

Tab. 3.19 : Propriétés du superplastifiant utilisé

La plage d'utilisation usuelle du superplastifiant est de l'ordre de 0,4 à 1,5 %.

3.5 Conclusion

Les essais d'identification des matériaux de l'étude ont permis d'apprécier leurs qualités vis-à-vis des spécifications normatives pour un usage dans les bétons. Il s'agissait aussi de fournir des valeurs numériques précises pour pouvoir notamment utiliser le logiciel BétonlabPro2, et calculer ensuite les dosages des différentes formules de bétons.

Ces aspects font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

FORMULATIONS ET FABRICATIONS DES BETONS CALCAIRES ET DES MORTIERS DE BETONS EQUIVALENTS (MBE)

4.1 Introduction

Ce chapitre présente tout d'abord le plan choisi pour l'étude. L'outil adopté pour la formulation théorique des différents mélanges est le logiciel BétonlabPro2. Une présentation de ce logiciel, ainsi que des modèles qui lui sont associés, sont également faites. Ce chapitre définit ensuite les étapes suivies pour les simulations des bétons à l'aide de ce logiciel. Parallèlement, une méthode graphique selon l'approche de Dreux-Gorisse a été utilisée. Les courbes granulaires des mélanges obtenues par les deux méthodes sont alors confrontées.

Une méthode de formulation des mortiers de bétons équivalents (MBE) est également présentée. C'est une méthode complémentaire à la méthode de la sonde (présentée dans le chapitre précédent) qui sert à étudier le couple superplastifiant – fillers, à dosage en ciment constant. Les résultats obtenus permettent de comparer les dosages de saturation en superplastifiant obtenus par les deux méthodes. En premier lieu, le but et le principe de la méthode MBE sont présentés. En second lieu, les étapes de calcul de la composition d'un mortier de béton équivalent ont été définies, entre autres, le calcul des surfaces développées des constituants de chaque mélange. En dernier lieu, les étapes de fabrication des MBE ont été présentées (mode de malaxage et mesures au mini-cône), ainsi que les résultats obtenus.

Enfin, ce chapitre présente les étapes de préparation des matériaux avant chaque gâchée, le calcul des formules de bétons, les fiches expérimentales des mélanges formulés, les étapes suivies pour la réalisation des gâchées, les types de bétons fabriqués et la composition de chaque série de béton.

4.2 Plan de l'étude

L'étude expérimentale comprend, en premier lieu, la formulation théorique des bétons courants à avec les cinq sables classés f_3 , f_{10} , f_{16} , f_{22} et f_{dec} et ayant un taux théorique de fines de 0, 6, 12, 18 et 24 %. Pour chaque sable, trois bétons se distinguant par leur classe de consistance ont été fabriqués. Il s'agit d'un béton plastique (affaissement au cône d'Abrams $A=7 \pm 2$ cm), d'un béton très plastique ($A=15 \pm 2$ cm) et d'un béton fluide ($A=22 \pm 2$ cm). Les formules des différents bétons, trouvées théoriquement, ont ensuite été réalisées expérimentalement. Par la suite, les mélanges très plastiques et fluides ont été reconduits avec l'utilisation d'un superplastifiant (SP). Enfin, le mélange le plus fluide ($A=23$ cm) et le plus

riche en fines (24%) a été formulé avec différents dosages de SP. Les propriétés mécaniques ont été mesurées à 28 jours pour les trois séries de bétons fabriqués.

Les mélanges très plastiques, avec et sans SP, ont été choisis pour les mesures de variations dimensionnelles et comme mélanges de référence pour les mortiers de bétons équivalents (MBE).

Le plan expérimental retenu pour la présente étude est représenté par le diagramme de la Fig .4.1. Au total, trente trois bétons ont été formulés et vingt neuf mortiers de bétons équivalents MBE ont été réalisés. La mesure des propriétés des bétons fabriqués et la réalisation des MBE font l'objet du chapitre suivant.

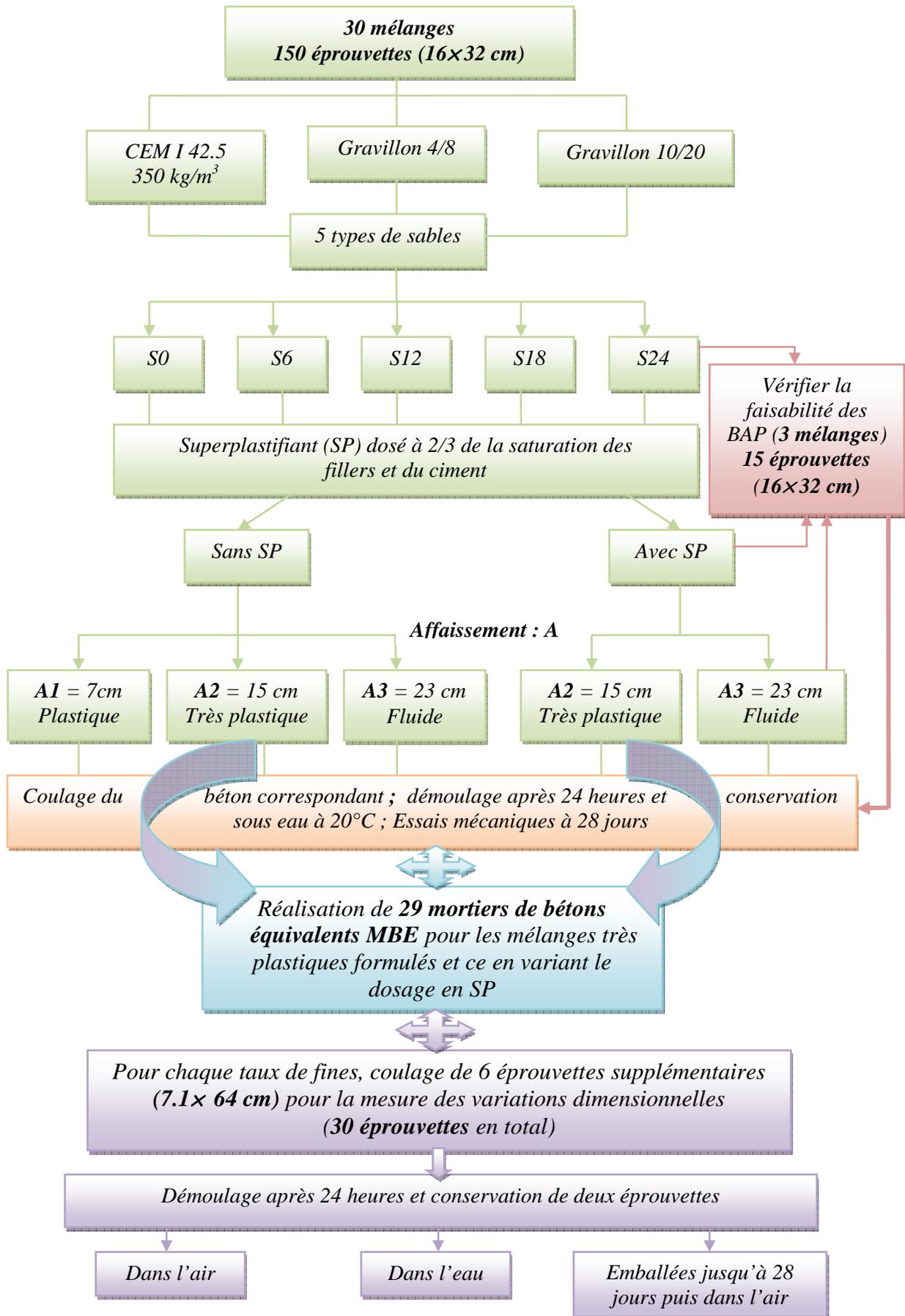


Fig. 4. 1 : Diagramme du plan expérimental retenu

4.3 Choix de la méthode de formulation des mélanges: le logiciel BétonLabPro2

Il existe de nombreuses méthodes de formulation de bétons, comme par exemple celles de Dreux-Gorisses, de Bolomey, de Faury, d'Abrams, de Vallette et de Joisel. Elles sont de nature empirique. La méthode la plus pratiquée en Tunisie est celle de Dreux-Gorisses [Dreux, Festa , 1995].

Généralement, l'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées. Mais face aux progrès techniques, à l'apparition des nouvelles gammes de bétons, à l'emploi fréquent des adjuvants et à l'utilisation des additions minérales - telles que les fillers calcaires - ou encore à l'utilisation des fibres, on se trouve confronté à un nombre croissant de variables non maîtrisées par les méthodes de formulations déjà citées. Il nous est donc apparu nécessaire de recourir à des méthodes de formulation plus rationnelles, comme celle basée sur les modèles de LCPC, qui prennent en compte ces différentes variables. Les modèles en question ont été regroupés dans un premier logiciel destiné surtout à la formation à la formulation des bétons ; Betonlab [de Larrard *et al.*, 1992]. Après plusieurs années de recherches, une version professionnelle du logiciel est apparue ; BétonlabPro1 (non diffusée) puis BétonlabPro2 [Sedran et de Larrard, 2000]. Cet outil apporte des réponses rapides à des problèmes industriels concrets et permet surtout de réduire considérablement le nombre d'essais sur béton. Notons qu'au cours de nos travaux, la version BétonlabPro3 de ce logiciel a été publiée [de Larrard, Sedran, 2007].

Dans le cadre de nos travaux, compte tenu des paramètres étudiés, les différents bétons contenant deux gravillons et successivement l'un des sables reconstitué ont été formulés et optimisés à l'aide du logiciel BétonLabPro2 (dont une licence a été acquise par le laboratoire de Génie Civil de l'ENIT). Ce logiciel est basé sur un ensemble de modèles mathématiques. Ceux qui concernent plus directement notre recherche sont résumés ci-après. Le logiciel est associé à un ouvrage présentant notamment les fondements de ces modèles, écrit en anglais par F. de Larrard [de Larrard, 1999]. La version française a été traduite par A. Lecomte [de Larrard, 2000]. Parallèlement, la formulation de tous les mélanges a aussi été établie avec la méthode de Dreux-Gorisses, pour pouvoir comparer les deux méthodes et faire le choix définitif des formules retenues.

4.3.1 Présentation du logiciel BétonlabPro2

BétonlabPro2 [Sedran, de Larrard, 2000] est un logiciel de formulation des bétons, capable d'optimiser des compositions de bétons et matériaux cimentaires sur la base d'un cahier des charges performantiel. Il met à la disposition du praticien les acquis les plus récents de la science des bétons, décrits notamment dans l'ouvrage associé au logiciel [de Larrard, 2000]. Il utilise une base de données dans laquelle l'utilisateur stocke les mesures réalisées sur les constituants : granulats, ciments purs ou composés, additions minérales, adjuvants...

Après sélection des matériaux, deux voies de formulation sont possibles : i) l'opérateur donne une composition et le logiciel prédit les propriétés du béton. En faisant varier la composition, on évalue l'importance de tel ou tel paramètre sur les propriétés. On peut ainsi anticiper les variations de performances pour des variations de composition ; ii) l'utilisateur fixe les performances à atteindre pour un critère d'optimisation donné (le coût du béton par exemple), et le logiciel détermine alors, si la possible physique existe, la composition qui satisfait le cahier des charges.

4.3.2 Principaux modèles associés à BétonlabPro2

Le Modèle d'Empilement Compressible (MEC)

Le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) vise à prédire la compacité Φ d'un mélange granulaire quelconque à partir de la connaissance des compacités des tranches monodimensionnelles qui le compose (compacités virtuelles), de la distribution granulaire et d'un indice de serrage décrivant le mode de mise en place [De Larrard, Sedran, 1999]. La compacité Φ est définie comme étant le rapport du volume granulaire solide au volume total :

$$\Phi = \frac{V_s}{V_T} \quad (\text{Rel. 4.1})$$

Elle dépend de la taille des grains, de leur forme et de la manière dont est réalisé l'empilement.

La compacité virtuelle γ est un concept théorique qui décrit la compacité maximale qu'il est possible d'atteindre en plaçant les grains un à un dans le mélange, tout en respectant leur intégrité. Par convention, une classe monodimensionnelle est un ensemble de grains dont la

grosseur est comprise entre deux tamis successif de la série normalisée. Pour calculer la compacité d'un empilement polydisperse à n classes monodimensionnelles, on s'intéresse à chaque classe monodimensionnelle (ou monodisperse) caractérisée par la compacité maximale β_i qu'elle atteint lorsqu'elle est empilée isolément et de façon déterministe. On calcule alors les compacités γ_i en considérant successivement chaque classe i comme étant en situation « dominante », au regard de l'espace laissé disponible par les classes plus grossières, et de l'espace comblé par les classes plus fines. La compacité maximale correspond à la situation où l'une des classes i forme une phase continue qui « bloque » le système. Ces calculs prennent en compte deux types d'interactions granulaires ; l'effet de paroi exercé par les gros grains envers les petits grains, et l'effet de desserrement exercé par les grains plus fins sur les gros grains [de Larrard, Sedran, 1999]. Par effet de paroi, on entend qu'un mélange binaire présente en périphérie d'un grain plus gros un supplément de porosité proportionnel à la surface du gros grain. Le desserrement d'un empilement de gros grains est provoqué par les grains fins qui ne pénètrent pas entièrement dans la porosité des gros grains. En tenant compte de ces deux types d'interactions, la compacité γ_i s'écrit :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - 1/\beta_j)]y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j]y_j} \quad (\text{Rel. 4.2})$$

avec :

- β_i et β_j les compacités virtuelles des classes monodisperses i et j de diamètre d_i et d_j ;
- y_j est le volume partiel de ces classes par rapport au volume granulaire total ;
- a_{ij} est le coefficient de desserrement ;
- b_{ij} est le coefficient d'effet de paroi

Pour calculer la compacité réelle Φ , il faut tenir compte du mode de mise en place du système par le biais d'un indice de serrage K définie par la relation implicite suivante :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}}{1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (\text{Rel. 4.3})$$

où Φ_i et Φ_i^* sont respectivement la compacité réelle et la compacité maximale de la tranche granulaire d'indice i.

Cette relation relie la compacité Φ et l'indice de serrage K . Connaissant l'un on peut donc atteindre l'autre.

L'optimisation de la distribution des tailles pour atteindre la compacité maximale n'est pas toujours le seul objectif. La limitation de la ségrégation du mélange peut aussi en être un autre. Un diagramme de remplissage permet alors l'appréciation de la stabilité du mélange. L'étendue granulaire du béton est fractionnée en classes agrégées i de rapport des tailles 2,5. Pour chaque classe agrégée, le ratio de remplissage Φ_i/Φ_i^* relatif à la classe agrégée i est exprimé. Plus ce rapport est faible par rapport aux classes voisines, plus la classe concernée risque de ségréger. L'indice de ségrégation S est alors défini à partir du diagramme de remplissage comme étant le complément à 1 du ratio de remplissage le plus faible. On cherche alors à éviter la ségrégation en évitant la présence de « trous » dans le diagramme de remplissage. Quant au ressuage, il est corrélé par la hauteur moyenne des pics dans le domaine des fines. Plus les pics sont hauts, plus le ressuage est faible [de Larrard, Sedran, 1999].

Modèles rhéologiques

Une série d'expériences réalisées par de Larrard et Ferraris avec le rhéomètre BTRHEOM [de Larrard, 2000] a montré qu'un béton plastique à fluide pouvait être assimilé à un corps binghamien ; son comportement rhéologique se réduit alors à une droite dans un repère $(\dot{\gamma}, \tau)$. Deux modèles semi-empiriques permettent alors d'approcher le seuil de cisaillement τ , et la viscosité plastique μ . Le premier est relié aux concentrations relatives individuelles, le second à la concentration relative globale.

La viscosité plastique du béton frais μ est définie par l'accroissement de la contrainte de cisaillement τ avec le gradient de vitesse $\dot{\gamma}$. La modélisation de la viscosité plastique a été obtenue en comparant le volume solide Φ du béton désaéré au volume solide maximal Φ^* de ses particules lorsqu'elles sont compactées à un indice de serrage $K=9$. Cette valeur correspond à un arrangement dense de référence obtenu par un processus aléatoire d'empilement. La première étape consiste à définir la quantité d'eau qui va juste remplir le volume des vides (empilement bloqué, viscosité qui tend vers l'infini), et d'en déduire Φ^* . L'ouvrabilité du béton sera ensuite contrôlée par une augmentation de cette quantité d'eau (d'où découle Φ).

La viscosité plastique est alors reliée à la concentration solide Φ/Φ^* selon la relation :

$$\mu = \exp \left[x \left(\frac{\Phi}{\Phi^*} - y \right) \right] \quad (\text{Rel. 4.4})$$

avec x et y deux constantes.

Le seuil de cisaillement τ_0 est la contrainte minimale nécessaire pour cisailer le béton frais remanié. Le même programme expérimental avec le rhéomètre BTRHEOM a permis de modéliser le seuil de cisaillement. Il peut être considéré comme le résultat macroscopique de la friction entre les grains. Le seuil de cisaillement est prédit d'après le modèle paramétrique suivant :

$$\tau_0 = \exp \left[2,537 + \sum_{\text{granulats}} a_i K_i + [0.224 + 0.910(1 - Sp/Sp^*)^3] K' c \right] = f \left(\sum_{i=1}^n a_i K'_i \right) \quad (\text{Rel. 4.5})$$

avec :

- a_i un coefficient supposé augmenter quand le diamètre diminue. Il est déterminé pour chaque tranche granulaire de diamètre moyen d_i , selon la relation :

$$a_i = 0.736 - 0.216 \log(d_i) \quad (\text{Rel. 4.6})$$

- K'_i est la contribution de la fraction i à l'indice de serrage du béton frais (K' est l'indice de serrage du béton sans air).
- K_i est l'indice de serrage partiel relatif à la tranche granulaire i.
- Sp/Sp^* est la quantité de superplastifiant par rapport à la quantité de saturation (en extrait sec ES).

L'affaissement au cône d'Abrams A est estimé à partir du seuil de cisaillement τ_0 du béton et de sa masse volumique ρ , selon la relation :

$$A = 300 - 347 \frac{(\tau_0 - 212)}{\rho} \quad (\text{Rel. 4.7})$$

où A est exprimé en mm, ρ en kg/m^3 et τ_0 en Pa.

La précision obtenue dans la prévision des affaissements expérimentaux est de l'ordre de 40 à 50 mm.

Air occlus

L'évaluation quantitative de l'air occlus sert non seulement à connaître la composition exacte d'une unité de volume de béton en place, mais elle permet aussi de prédire les propriétés mécaniques du béton durci (l'air affecte la résistance). Pour estimer la quantité d'air occlus, un modèle a été étalonné à partir de deux termes : le premier tient compte de la consistance (affaissement) et de la présence de plastifiant ou de superplastifiant ; le second illustre la capacité de piégeage du squelette. L'air est estimé à partir de la relation ci-dessous :

$$a = (1 + 0.882 pl + 0.0683 sp - 0.00222 A)(- 0.000988 G + 0.00368 S) \quad (\text{Rel. 4.8})$$

où :

- a est le volume d'air occlus (litre/m³)
- G et S sont les masses de gravillons et de sables en kg/m³ ;
- A est l'affaissement en mm ;
- pl et sp sont les masses d'extraits sec de plastifiant et superplastifiant en kg/m³.

L'erreur moyenne de ce modèle est de 0,3%.

Modèles de résistance

Pour prédire la résistance à la compression, le béton est assimilé à un matériau composite formé du granulat dispersé dans une matrice liante qui est la pâte de ciment hydratée, l'ensemble étant considéré homogène à l'échelle macroscopique [De Larrard, 2000]. Ce modèle pâte-granulat permet de prédire, sur cylindres, la résistance à la compression à différentes échéances allant de 1 jour à 1 an. Cette résistance prévisionnelle à la compression $f_c(t)$ est calculée par étapes. La première consiste à chercher la quantité de ciment équivalent c_{eq} . (Rel. 4.9).

$$c_{eq} = c \left[1 + 1.1 \left(1 - \exp \left[- \frac{\sum K_{p,i}(t) \cdot p z_i}{c} \right] \right) + 0,017 t_{C3A} \left(1 - \exp \left(- 79 \frac{\sum f_{i,j}}{t_{C3A} \cdot c} \right) \right) \right] \quad (\text{Rel. 4.9})$$

Avec :

- c est la masse de ciment (clinker) dans le volume unité de béton frais (Kg)
- t_{C3A} la teneur en C₃A du clinker
- $p z_i$ et $K_{p,i}(t)$ sont la quantité de pouzzolane et leur activité dans le temps ;
- $f_{i,j}$ est la quantité de fillers calcaires dont l'effet liant est tributaire du taux de C₃A du ciment

La deuxième étape consiste à calculer la résistance à la compression de la matrice fc_m donnée par la Rel. 4.10 suivante :

$$fc_m(t) = 13,4\sigma_{c28} \left[d(t) - 0,0023 \frac{d(7)}{t} \cdot \frac{\sum S_{FI,j} f_{i_j}}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{e+a}{c_{eq}} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13} \quad (\text{Rel. 4.10})$$

fc_m prend en compte le liant équivalent (c_{eq}), le volume d'eau efficace (e) et l'air occlus (a) dans le volume unité de béton frais, en litres. Elle considère aussi :

- la classe de résistance du ciment σ_{c28} .
- $d(t)$ et $d(7)$ qui sont des paramètres cinétiques relatifs à la montée de la résistance dans le temps (t en jours),
- la surface spécifique des fillers calcaires (SFI)
- l'épaisseur maximale de pâte EMP. Il s'agit de la distance entre deux gros grains.

EMP (Rel. 4.11) est fonction :

- de la dimension maximale des grains D_{max} (qui correspondent conventionnellement à la taille du tamis laissant passer 90 % du mélange),
- du volume solide (g) du granulats de taille $> 80\mu m$ dans l'unité de béton
- de la compacité granulaire de l'empilement sec du même granulats (g^*). Cette dernière propriété peut être mesurée, ou calculée avec le MEC, avec $K=9$.

$$EMP = D_{max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad (\text{Rel.4.11})$$

La dernière étape est de déduire la résistance du béton à partir de la résistance de la matrice fc_m , en utilisant la relation suivante :

$$fc(t) = \frac{pfc_m(t)}{1 + qfc_m(t)} \quad (\text{Rel.4.12})$$

avec p et q deux coefficients décrivant respectivement l'adhérence pâte-granat et l'effet limitant du granulats.

Les valeurs usuelles du coefficient p sont comprises entre 0,5 et 1,25. Celles du coefficient q sont comprises entre 0 et 0,006. Ces deux coefficients ne peuvent pas être mesurés directement. La technique la plus triviale consiste à tester au moins deux bétons de résistances contrastées réalisés avec un ciment Portland de classe de résistance connue.

Ce modèle tient compte de la contribution des fillers. En effet, la présence des fillers calcaires, ajoutés au ciment Portland ou apportés par les granulats, influe d'une part sur la résistance de la matrice liante $f_{cm}(t)$ dans le temps, et d'autre part sur la quantité du ciment équivalent C_{eq} . Pour la résistance, elle intervient par un effet cinétique accélérateur contrôlé par la surface spécifique et le dosage massique f_i des fillers. Pour le liant équivalent, elle intervient par le dosage massique du fillers f_i et la quantité de C_3A dans le clinker (contrôlant la formation des carboaluminates). En l'absence d'autres additions (pouzzolanique) la quantité de ciment équivalent C_{eq} qui tient compte de l'effet liant des fillers s'écrit alors :

$$c_{eq} = c \left[1 + \Psi'_{max} \cdot t_{C_3A} \left(1 - \exp \left(K_{FI} \frac{\sum f_i}{t_{C_3A} \cdot c} \right) \right) \right] \quad (\text{Rel.4.13})$$

avec Ψ'_{max} et K_{FI} deux paramètres de prise en compte de l'effet liant des fillers calcaires,

La résistance de la matrice à 28 jours, qui tient compte de l'effet accélérateur des fillers calcaires s'écrit alors

$$f_{c_{m28}} = 13,4 \sigma'_{c28} \left[-B \frac{d(7)}{28} \cdot \frac{\sum S_{FI} f_i}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{e+a}{c_{eq}} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13} \quad (\text{Rel.4.14})$$

avec S_{FI} la surface spécifique des fillers calcaires présents dans le volume unité de béton frais. B est un paramètre de prise en compte de l'effet accélérateur des fillers calcaires. Les valeurs proposées des coefficients B , Ψ'_{max} et K_{FI} [De Larrard, 2000] valent respectivement : $B=0,0023$, $\Psi'_{max}= 0,017$, $K_{FI}=79$.

Si tous les paramètres du modèle de résistance à la compression sont déterminés avec soin, sa précision du modèle est alors en deçà de 2 à 3 MPa [de Larrard, 2000]. Précisons toutefois que ce modèle a été calibré sur des bétons ayant généralement une structure granulaire optimisée et dont les sables ne contenaient pas une teneur en fillers calcaires dépassant 10 %.

En ce qui concerne la résistance à la traction par fendage f_t , elle est déduite de la résistance à la compression f_c par le biais d'un coefficient kt . Le modèle proposé s'écrit :

$$f_{t28} = kt \cdot f_{c28}^{0.57} \quad (\text{Rel.4.15})$$

Le coefficient de traction kt dépend essentiellement du granulat pour une résistance donnée. Il est contrôlé par la nature de la roche (propriétés mécaniques et pétrographiques) et il

est indépendant de la distribution de la taille ou de la concentration en granulats dans le matériau. Ce coefficient est calibré au cas par cas sur des essais de compression et de fendage réalisés sur des bétons au squelette granulaire optimisé. Ce coefficient peut dépendre aussi du mode de conservation des éprouvettes. Sa valeur habituelle est comprise entre 0,32 et 0,47 ($\text{MPa}^{-0,43}$).

Si le paramètre kt est déterminé avec soin et si les essais de compression sont effectués avec précision, la traction par fendage est alors donnée à 0,17 MPa près [de Larrard, 2000].

Modèle de déformation (retrait total)

Les facteurs intervenant dans la prévision du retrait total sont la taille du corps d'épreuve, le retrait endogène au premier âge et la quantité de fissures de peau qui peuvent apparaître au cours du séchage. Un modèle prédictif du retrait total du béton depuis sa mise en place jusqu'au terme espéré d'une structure normale du génie civil (100 ans) a été développé. Des éléments de diamètre 160 mm ont été utilisés pour valider ce modèle, avec une humidité relative égale à 50%. Le modèle trisphère a été adopté pour déduire le retrait total de la formule de béton. Le retrait total est prédit d'après le modèle suivant :

$$\varepsilon_{rt} = \frac{\left(1 + \frac{E_{md}}{E_g}\right) \left(1 - \frac{g}{g^*}\right) + \frac{4 \frac{E_{md}}{E_g} (1 - g^*) \frac{g}{g^*}}{g^* + \frac{E_{md}}{E_g} (2 - g^*)}}{1 + \frac{g}{g^*} + \frac{E_{md}}{E_g} \left(1 - \frac{g}{g^*}\right)} \varepsilon_{rt}^m \quad (\text{Rel.4.16})$$

avec ε_{rt} et ε_{rt}^m sont respectivement le retrait total du béton et de la matrice (ce dernier est calculé à partir de la résistance à la compression). E_{md} est le module différé de la matrice déterminé en condition scellées. E_g est le module d'élasticité du granulat (mesure directe ou ajustement tiré d'essais). Les paramètres g et g^* ont été définies précédemment dans le modèle de résistance.

Grâce à ces modèles, on dispose de moyens avantageux pour apprécier la capacité d'un granulat à contribuer aux propriétés mécaniques, par l'intermédiaire des coefficients p , q et kt , et au retrait, par l'intermédiaire du module E_g .

4.4 Formulations théoriques

La formulation théorique des bétons a été faite avec le logiciel BétonlabPro2 [Sedran, de Larrard, 2000]. La méthode de [Dreux, 1970] a aussi été appliquée dans sa partie concernant la recherche des proportions granulaire, à titre de comparaison. Des bétons tout calcaires contenant les mêmes gravillons et un sable dont le taux de fillers varie entre 0 et 24% ont ainsi été formulés.

4.4.1 Formulation à l'aide du logiciel BétonlabPro2

La démarche adoptée pour la formulation des bétons à l'aide du logiciel BétonlabPro2 est détaillée ci-après :

1ère étape : Données d'entrées nécessaires au logiciel

Pour utiliser le logiciel BétonLabPro2, il faut définir une banque de constituants contenant les propriétés de chaque matériau de l'étude. Dans des fenêtres appropriées, il faut donner le nom de chaque matériau (onglet « général »), puis saisir les propriétés générales dans l'onglet « propriétés » (voir Fig. 4.2 pour le cas d'un gravillon).

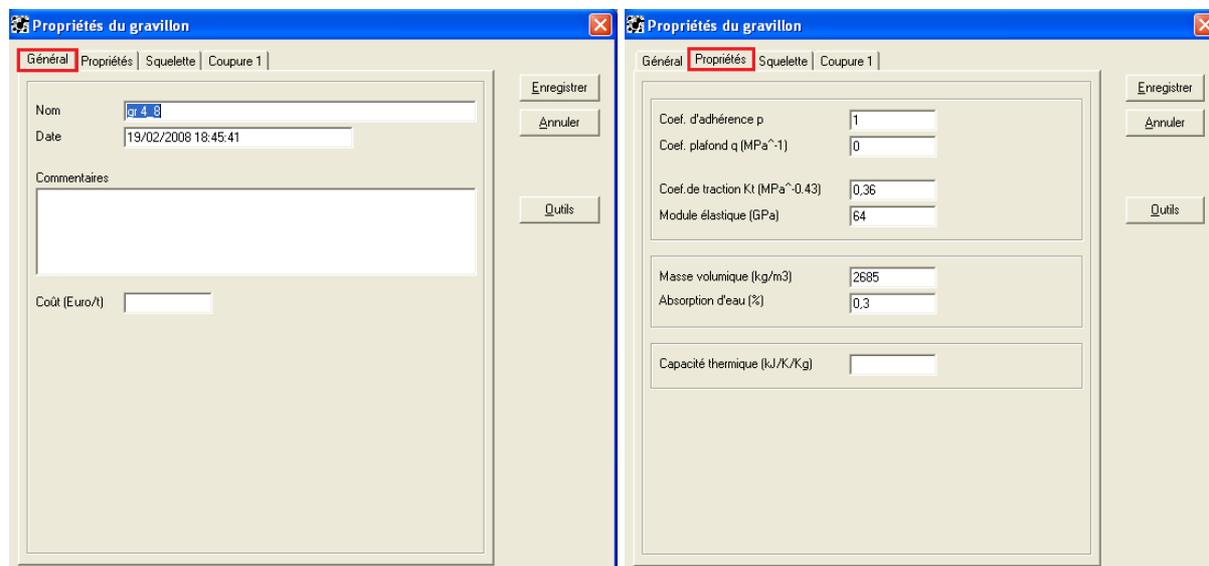


Fig .4. 2 : Propriétés des matériaux. Exemple du gravillon G 4/8

Pour les granulats de coupures supérieures à 80 μm , les propriétés minimales nécessaires sont la masse volumique réelle et l'absorption. Mais si l'on veut que le logiciel puisse prédire les propriétés mécaniques des bétons, il faut fournir aussi le coefficient d'adhérence p, le coefficient d'effet plafond q, le coefficient de traction Kt et le module

d'élasticité E_g . A ce stade, les paramètres p et q ont été pris égaux respectivement à 1 et 0. Les paramètres k_t et E_g ont été pré-fixés à 0,36 et 64 GPa, valeurs plausibles compte tenu de la nature des matériaux). Ils ont été modifiés par la suite, lorsque leur calibrage a été effectué à partir des mesures expérimentales présentées dans le chapitre suivant.

Pour les coupures inférieures à 80 μm ou pour des matériaux contenant des fines, le logiciel demande, dans l'onglet « propriétés », des informations supplémentaires telles que la nature des fines (calcaires ou siliceuses), leur surface spécifique et le dosage de saturation avec le superplastifiant utilisé (Fig.4.3).

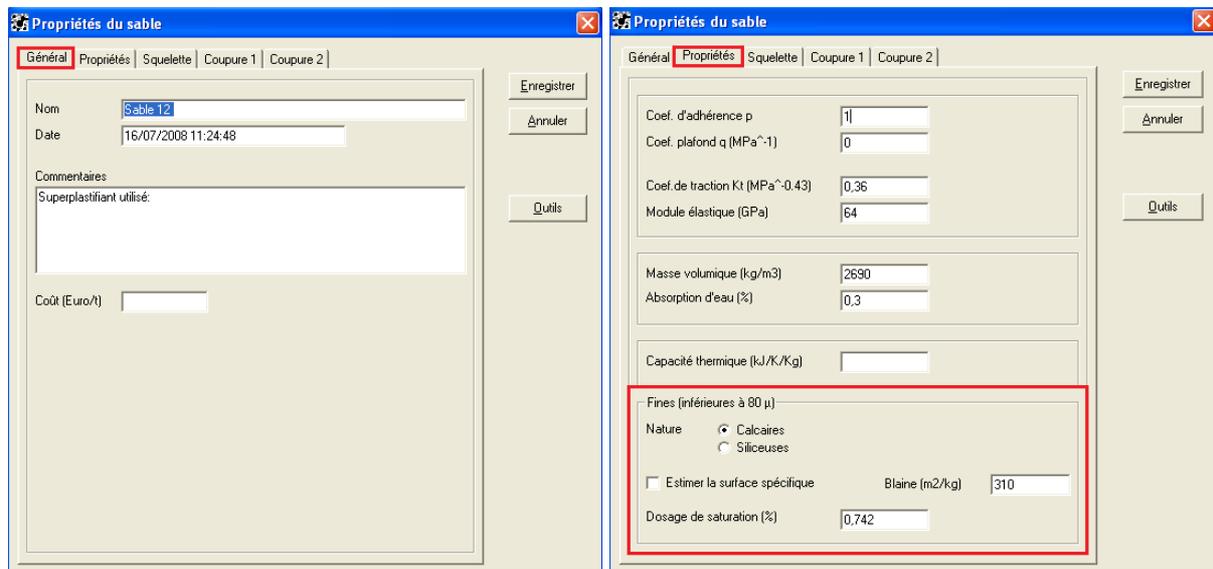
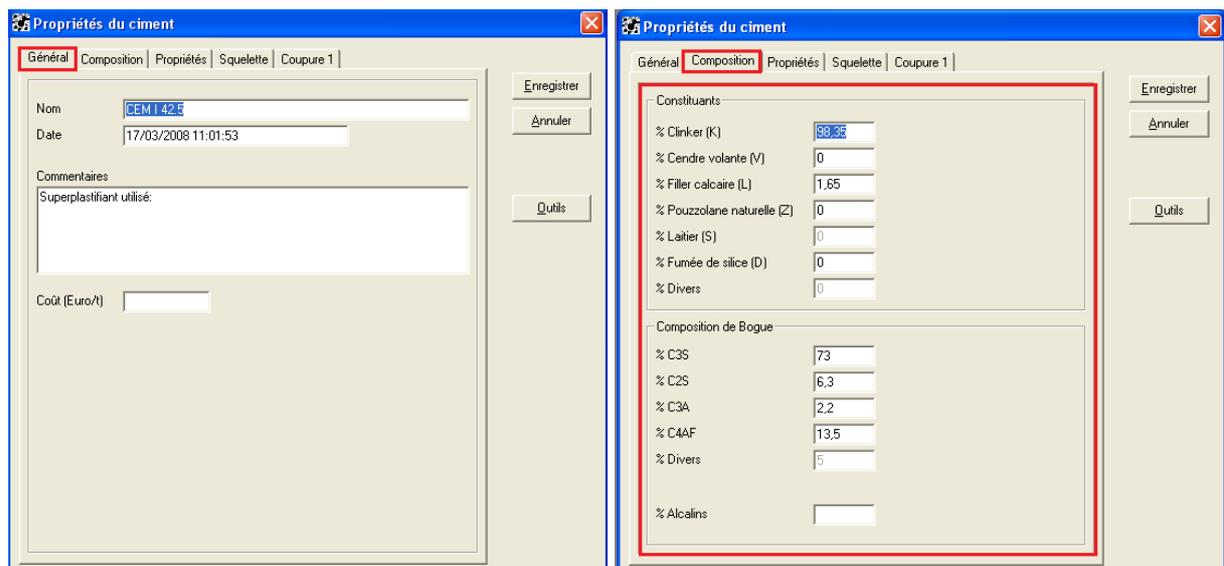


Fig. 4. 3 : Propriétés des matériaux. Exemple du sable S12



Classe vraie à	Valeur
1 jour	8,14
2 jours	19,1
3 jours	21,75
7 jours	34,18
28 jours	52,83
90 jours	
360 jours	

Masse volumique (kg/m³) : 3150

Capacité thermique (kJ/K/Kg) :

Dosage de saturation (%) : 0,62

Retrait endogène :

Kc (MPa) : 10

Fig. 4.4 : Propriétés des matériaux. Exemple du ciment CEM I 42.5 R

Pour le ciment, en plus de la masse volumique réelle et du dosage de saturation, les classes vraies à différentes échéances doivent être entrées. L'onglet « composition » permet de donner le pourcentage de ses différents constituants ainsi que la composition de Bogue du clinker (Fig. 4.4).

Pour le superplastifiant, il faut indiquer sa masse volumique réelle ainsi que sa concentration solide (Fig. 4.5).

Nom : Tempo 12

Date : 24/07/2008 08:45:15

Commentaires :

Coût (Euro/kg) :

Concentration solide (%) : 30,9

Masse volumique (kg/l) : 1,06

Fig. 4. 5 : Propriétés du superplastifiant

En second lieu, il faut entrer la granulométrie de chaque matériau dans l'onglet « squelette », à partir des refus sur les tamis disponibles. Le logiciel interpole les refus sur les tamis intermédiaires selon une relation semi-logarithmique. Pour les tailles inférieures à 80 µm, ce sont les valeurs obtenues par granulométrie laser qui sont utilisées.

En dernier lieu, il faut définir la compacité virtuelle β_i de chaque coupure élémentaire du matériau. Pour les gravillons, ces compacités sont déduites de la compacité Φ mesurée sur une seule coupure. Rappelons que les gravillons ont été lavés sur un tamis de 80 µm et la compacité a été mesurée dans un cylindre fixé à une table vibrante et sous contrainte (piston) de 10 kPa (§ 3.4.1.5). L'indice de serrage K associé à ce procédé est égal à 9. A ce stade, le logiciel permet de prendre en compte l'effet de confinement du moule et du piston à partir des dimensions de l'échantillon compacté (Fig. 4.6).

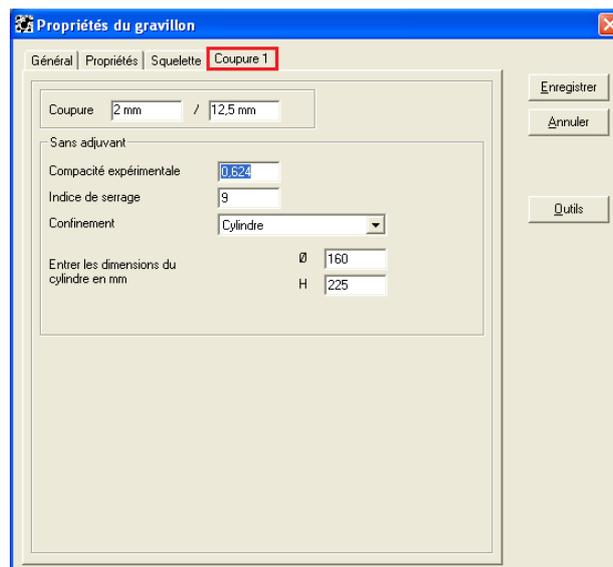


Fig. 4. 6 : Compacité d'une fraction grenue. Exemple du gravillon G 4/8

En utilisant la Rel. 3.2, ou encore la « boîte à outils » du logiciel, et à partir des mesures réalisées, on calcule la compacité expérimentale Φ du matériau (Fig. 4.6). Pour les sables, la compacité Φ a été déterminée sur deux coupures. L'une pour la fraction grenue (> 80 µm) à partir de la même technique et en considérant le même indice de serrage que précédemment. L'autre pour la fraction fine, à partir de mesures sur pâte de consistance normale (§ 3.4.2.4) et en considérant un indice de serrage K=4.8 [Lecomte *et al.*, 2009]. Cette compacité est

déterminée sans superplastifiant puis à saturation, avec le produit utilisé dans le mélange (Fig. 4.7).

A partir de la valeur de compacité expérimentale, le logiciel calcule les compacités virtuelles β_i sans superplastifiant et β_i^* avec superplastifiant (les compacités β_i^* sont calculées uniquement pour la fraction fine). Ces compacités virtuelles sont considérées uniformes sur la coupure considérée. Elles apparaissent aussi dans l'onglet « squelette » (Fig.4.8)

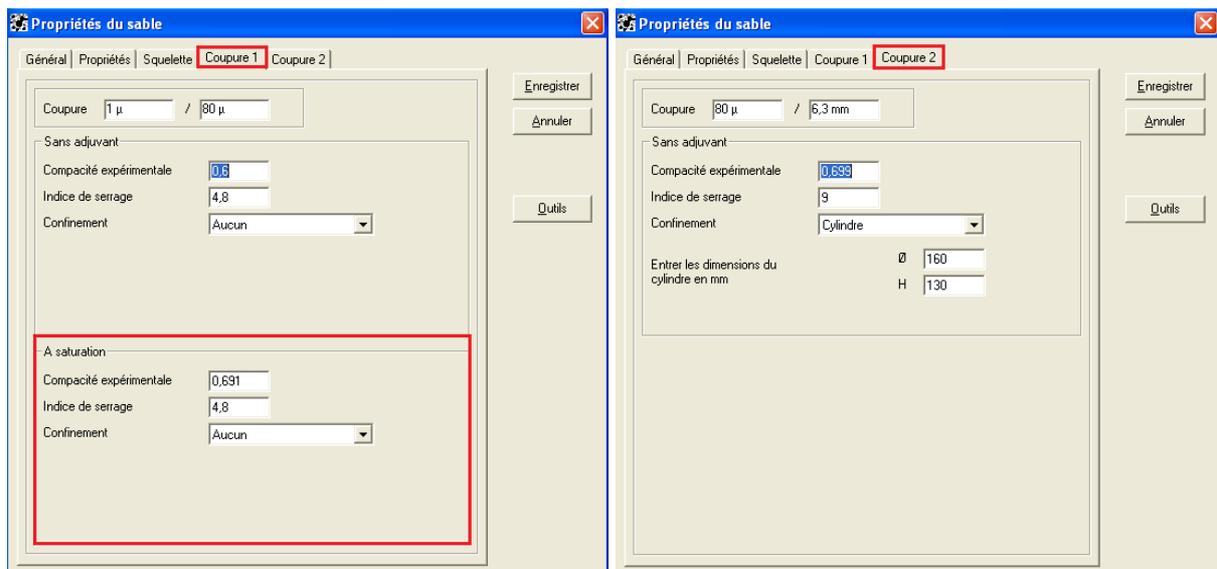


Fig. 4. 7 : Compacité d'une fraction fine. Exemple du sable S12

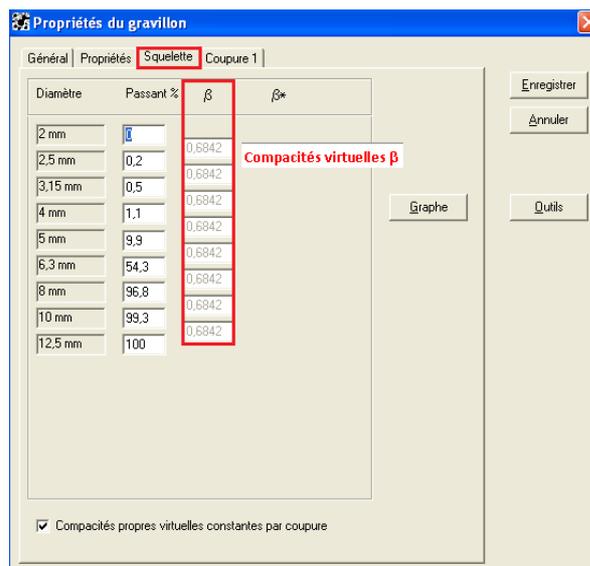


Fig. 4. 8 : Squelette du matériau. Exemple du gravillon G 4/8

2ème étape : Optimisation du squelette granulaire du mélange

A ce stade, on sélectionne dans la banque de constituants les matériaux nécessaires à la réalisation du mélange désiré : par exemple le ciment, les deux gravillons G4/8 et G10/20 et alternativement l'un des cinq sables reconstitué (Fig. 4.9). Le squelette granulaire optimisé peut être alors trouvé selon la démarche de [Baron-Lesage, 1976], Pour cela, on fixe tout d'abord une quantité de ciment et d'eau vraisemblables (par exemple 350 kg de ciment et 210 litres d'eau) et on cherche le squelette granulaire qui minimise l'indice de serrage, c'est-à-dire les proportions volumiques conférant la compacité maximale du mélange avec le volume de pâte choisi. Le module d'optimisation automatique est utilisé (Fig. 4.10).

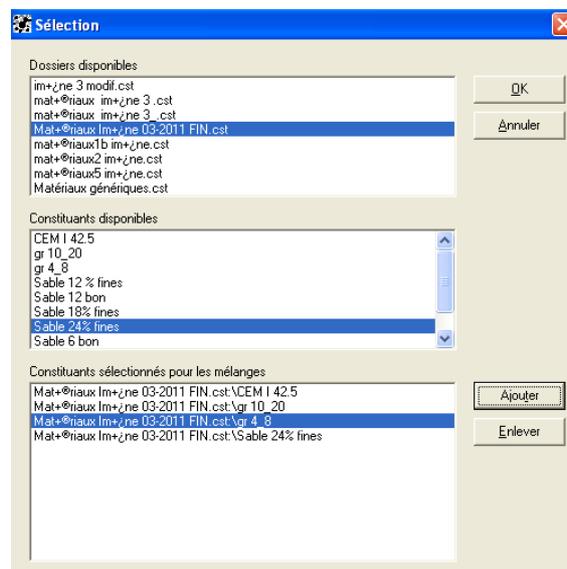


Fig. 4. 9 : Exemple de sélection des constituants du mélange S24Ai

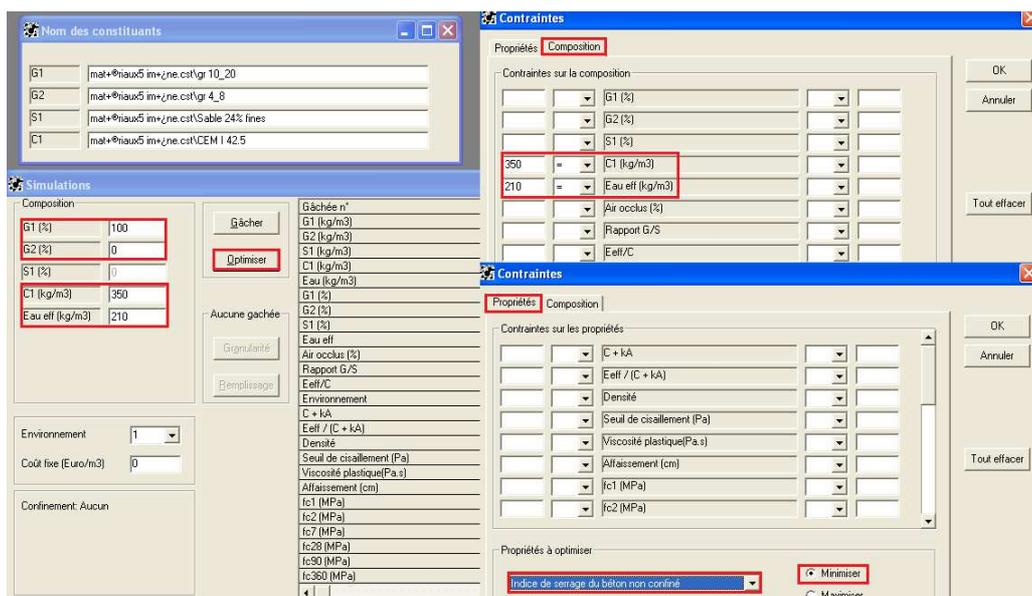


Fig. 4. 10 : Exemple d'optimisation d'un mélange granulaire selon la démarche Baron-Lesage

Les quantités d'eau et de ciment sont fixées. Les proportions granulaires varient jusqu'à trouver l'indice de serrage minimum.

Le squelette granulaire étant optimisé, on fixe alors les proportions trouvées des différents granulats dans l'onglet « composition ». On cherche ensuite les quantités de ciment et d'eau efficace qui conduisent aux propriétés recherchées, en termes notamment d'affaissement du béton frais et de résistance à 28 jours. Dans cette phase, on peut imposer par exemple la quantité de ciment, au regard des spécifications normatives notamment (Fig. 4.11).

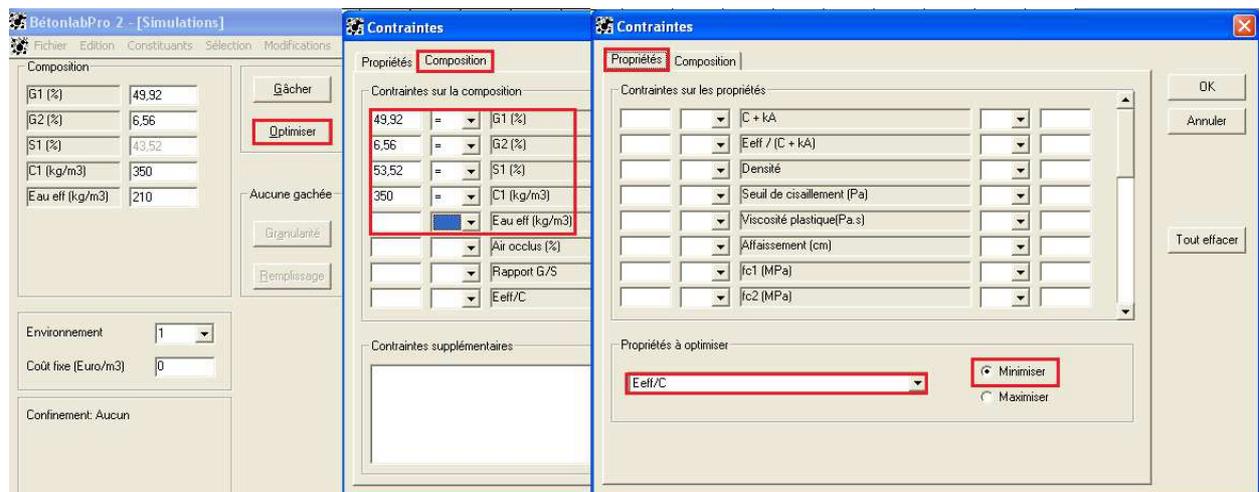


Fig .4. 11 : Exemple d'optimisation d'un mélange en fixant les proportions des constituants et en imposant certaines propriétés

3ème étape : Simulation des gâchées

La simulation des gâchées peut se faire en choisissant l'option « gâcher » ou bien l'option « optimiser ». Dans notre cas, c'est la seconde qui a été choisie le plus souvent. On fixe l'affaissement désiré sous l'onglet « propriétés » et le logiciel trouve la quantité d'eau efficace nécessaire (Fig. 4.12). Il indique alors les propriétés associées, rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité plastique), mécaniques (résistances à la compression jusqu'à un 1 an, résistance à la traction, module d'élasticité), fluage, retrait, etc. (Fig. 4.13). D'autres propriétés comme la capacité thermique, l'exothermie et le prix sont aussi proposées si les données nécessaires (propriétés spécifiques) sont fournies en amont (Fig. 4.14).

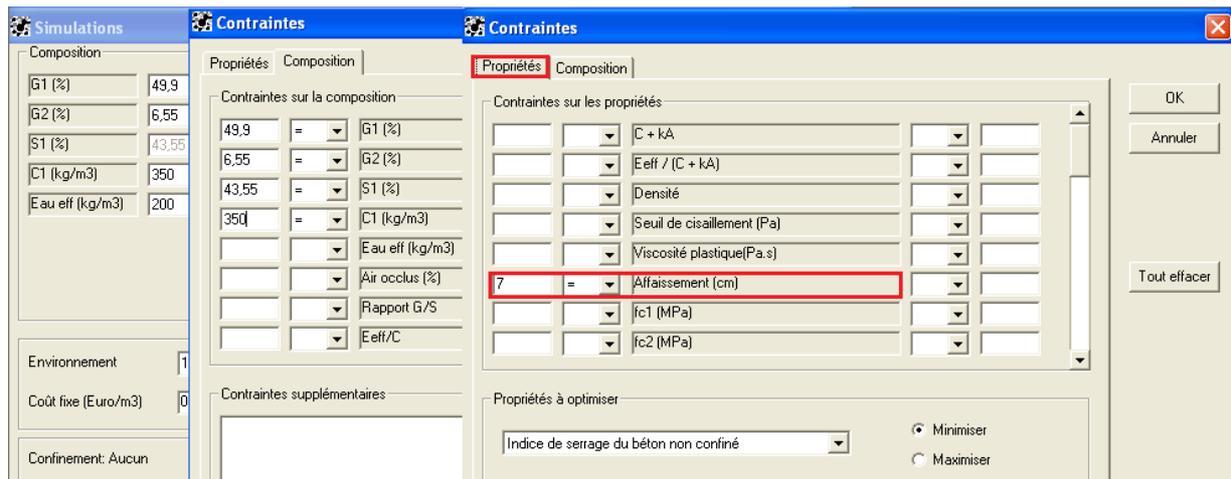


Fig. 4. 12 : Simulation du béton. Mélange S24A1

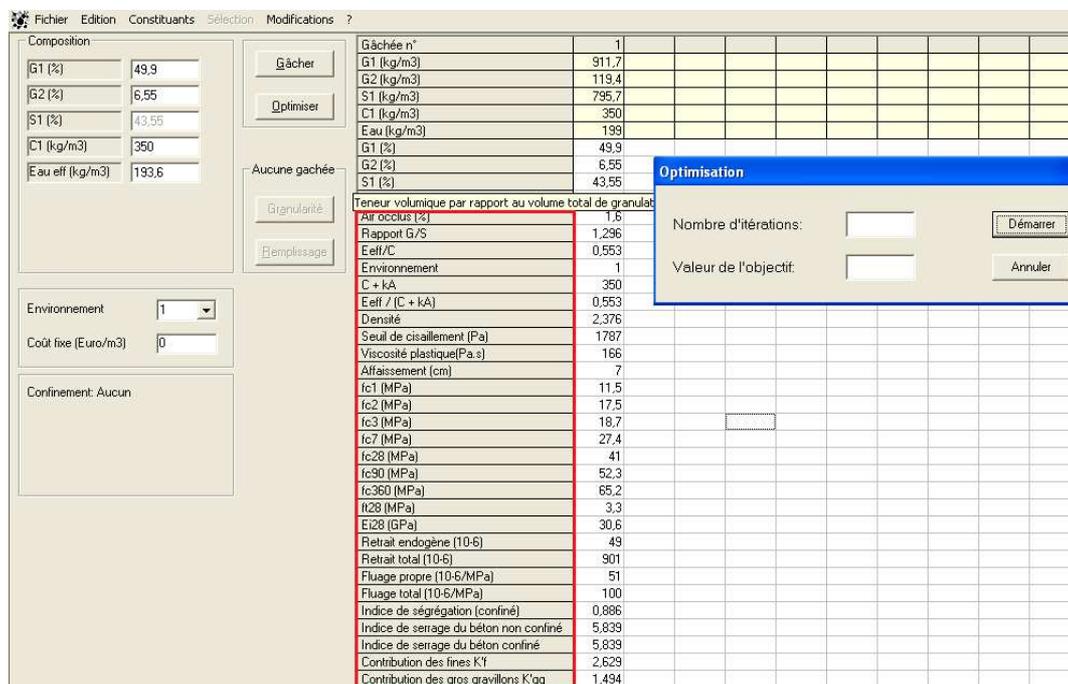


Fig. 4.13 : Résultats d'une simulation. Propriétés obtenues du mélange S24A1

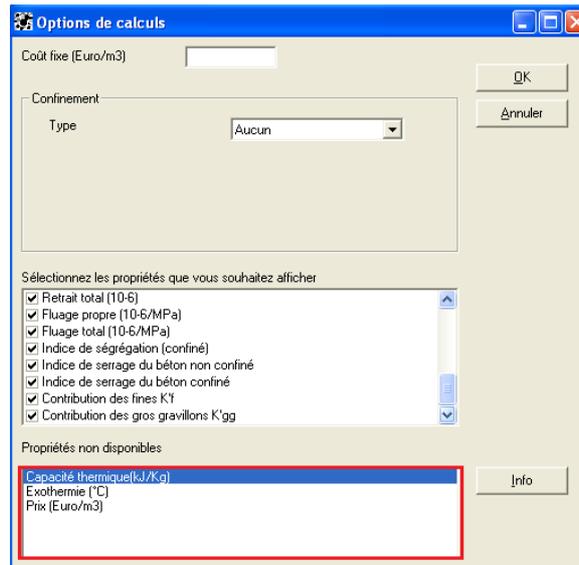


Fig. 4. 14 : Autres propriétés pouvant être prédites par le logiciel

Enfin, d'autres options sont disponibles telles que la granularité des mélanges (Fig. 4.15) et le diagramme de remplissage (Fig. 4.16) qui constituent une aide complémentaire au choix du mélange à réaliser.

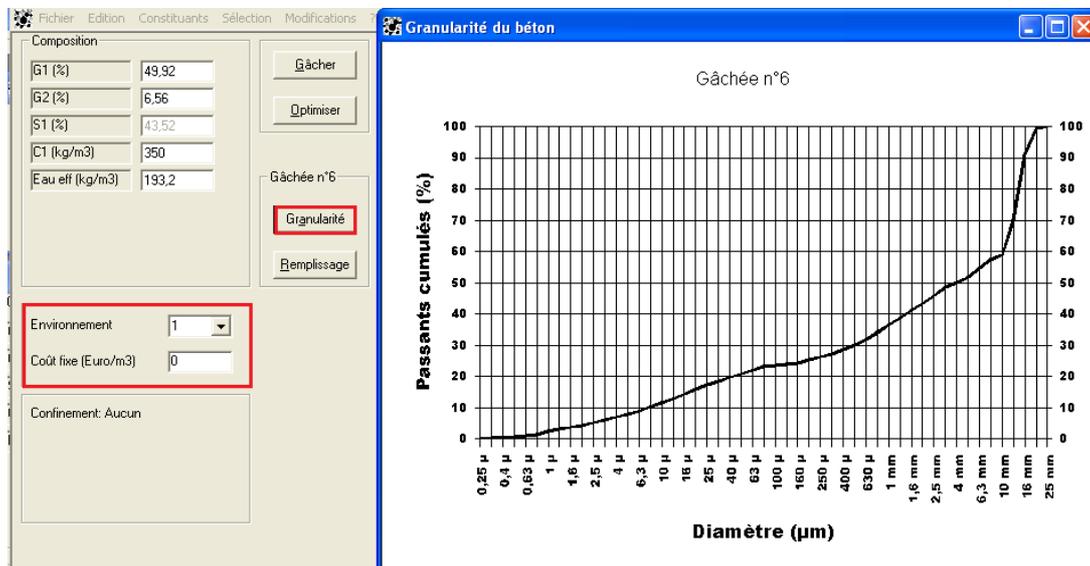


Fig. 4. 15 : Exemple d'une granularité du mélange

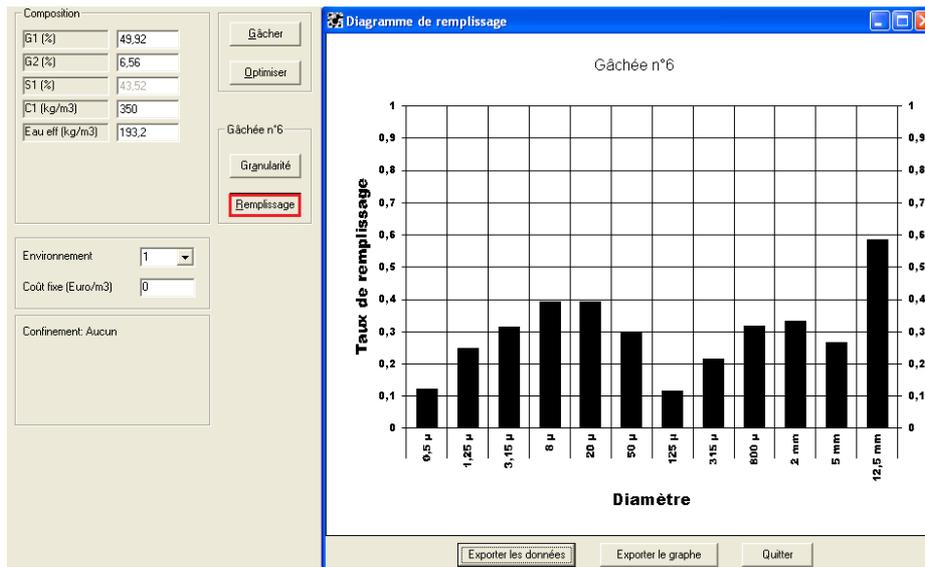


Fig. 4. 16 : Exemple d'un diagramme de remplissage

4.4.2 Formulation selon la méthode Dreux-Gorisse

Dans cette approche empirique [Dreux, Festa, 1995], les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB représentée par deux segments de droite dans le diagramme granulométrique. Selon les auteurs, cette courbe représente la distribution optimale, sans le ciment, qui conduit à la plus forte compacité granulaire. Le point O (origine) a pour coordonnées $[X_0=0,08 \text{ mm}, Y_0=0 \text{ \% passant}]$. Le point B (extrémité) a pour coordonnées $[X_B=D_{\max}, Y_B=100 \text{ \% passant}]$ (avec D_{\max} la taille du plus gros granulat). Le point A (brisure) a pour coordonnées $[X_A=D_{\max}/2 \text{ et } Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p]$. Les valeurs de K , K_s et K_p sont lues ou calculées à partir de tableaux ou d'abaques associés à la méthode où entrent en compte la consistance, le serrage, la finesse du sable et la forme des grains. Les proportions volumiques des différents granulats dans le mélange sont trouvées par interpolation graphique ou « lignes de partage ». Ces lignes relient le point 95 % des passants d'un granulat au point 5 % des passants du granulat suivant. Les points d'intersection entre ces lignes et la courbe granulaire de référence donnent directement les proportions respectives des granulats, en pourcentage du volume réel des constituants granulaires.

Les courbes granulaires trouvées par la méthode de Dreux-Gorisse et par BétonlabPro2 ont été tracées sur le même graphique pour chaque mélange (Fig. 4.17). Rappelons que les bétons sont réalisées toujours avec les mêmes gravillons et un seul sable Si parmi les sables fabriqués.

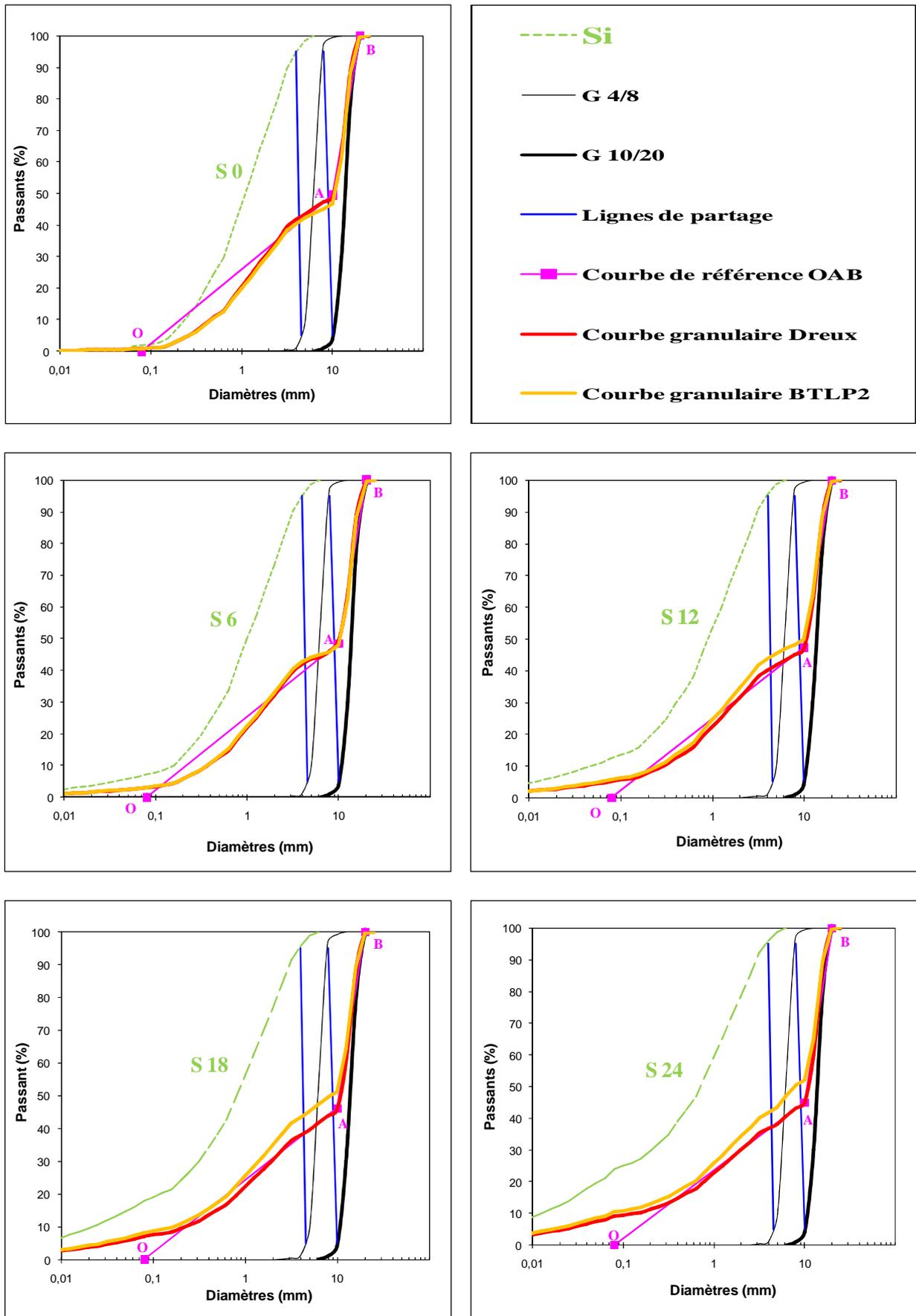


Fig. 4. 17 : Courbes granulaires des mélanges, selon BétonlabPro2 et Dreux-Gorisse

Ces figures montrent que les courbes granulaires des mélanges trouvées par l'approche de Dreux-Gorisse et celles trouvées par le logiciel BetonlabPro2 sont souvent confondues, du moins pour les mélanges réalisés avec les sables S0 et S6 (7,6% de fines). Par contre, des différences sont enregistrées pour les autres mélanges réalisés avec les sables S12 (12,5% de fines), S18 et S24. On peut en déduire que pour des taux de fines élevés, la méthode graphique de Dreux-Gorisse n'est probablement pas le mieux adaptée.

La formulation retenue pour tous les mélanges est celle donnée par BétonlabPro2. Les propriétés prédites par le logiciel seront vérifiées dans le chapitre suivant.

4.5 Mortiers de bétons équivalents (MBE)

Avec l'apparition des bétons fortement adjuvantés, des problèmes d'incompatibilité entre ciment et adjuvant (raidissement prématuré du béton) apparaissent parfois sur chantier, bien que les produits soient conformes aux normes en vigueur. Pour détecter cette problématique, une nouvelle méthode a été proposée. Il s'agit de la méthode du mortier de bétons équivalent (MBE).

4.5.1 Présentation de la méthode MBE

La méthode MBE consiste à concevoir, à partir d'une composition donnée d'un béton, un mortier de béton équivalent dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celle du béton d'origine [Schwartzentruber *et* Catherine, 2000]. Le but est de limiter les essais réalisés directement sur béton.

4.5.2 Principe de la méthode MBE

Le principe de la méthode MBE est basé sur l'existence d'une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose [Projet national CALIBE, 2004]. Ce dernier peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5 mm, ou bien à partir d'une composition théorique conduisant aux mêmes propriétés que celles du mortier tamisé. La composition théorique est déduite directement de celle du béton en corrigeant la quantité de sable de manière à ce que la surface granulaire unitaire du MBE soit la même que celle du béton [Projet national CALIBE, 2004]. Le MBE doit donc être composé en utilisant le sable du béton comme correcteur granulaire.

Les propriétés rhéologiques du MBE sont mesurées à l'aide d'un mini-cône (Fig. 4. 18) dont les dimensions sont une réduction de celles du cône d'Abrams (rapport d'homothétie de deux). Le mini-cône permet de mesurer l'affaissement ainsi que l'étalement du MBE étudié.

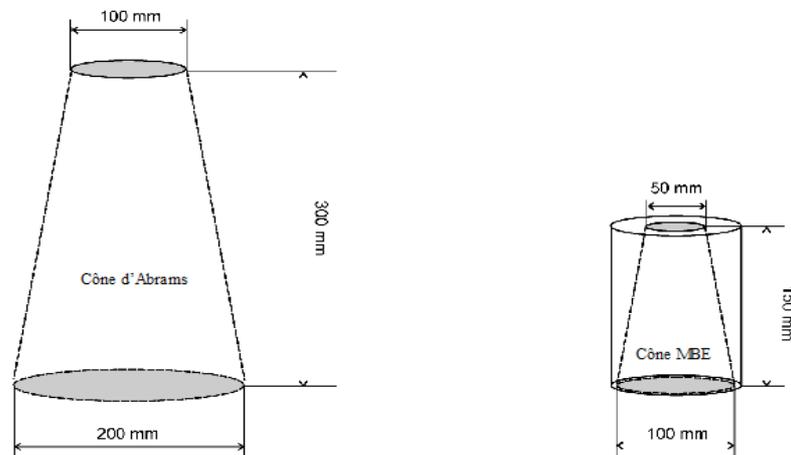


Fig. 4. 18 : Dimension du cône MBE par rapport au cône d'Abrams [Projet national CALIBE, 2004]

Des recherches [Schwartzentruber *et* Catherine, 2000] ont montré qu'une corrélation linéaire peut être établie entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au mini-cône. La relation entre ces deux mesures est modélisée par une droite valable dans les plages de mesures étudiées. La droite de corrélation doit être déterminée expérimentalement pour chaque composition. La méthode de MBE est applicable pour des bétons ayant un affaissement compris entre 5 et 25 cm. Elle est considérée comme optimale pour les affaissements compris entre 10 et 22 cm [Projet national CALIBE, 2004].

4.5.3 Calcul de la composition du mortier de béton équivalent

La formulation de MBE se fait directement à partir de la composition du béton initiale. Les mêmes constituants et les mêmes dosages doivent être conservés, excepté les gravillons qu'il faut retirer. Toutefois, il faut considérer que les quantités de pâte et de particules fines de sable qui adhèrent aux gravillons sont proportionnelles à la surface des gravillons [Schwartzentruber *et* Catherine, 2000]. Les surfaces spécifiques des sables et des gravillons utilisés doivent être donc déterminés.

α) - Calcul des surfaces développées par les granulats

Les données nécessaires au calcul sont l'analyse granulométrique de chaque constituant ainsi que leurs masses volumiques réelles. Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- tous les granulats sont des sphères ;
- ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau ;
- à l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

Les étapes de calcul des surfaces développées des deux gravillons, de masses volumiques voisines, sont les suivantes :

1. Granulométrie du mélange des gravillons du béton

Les deux gravillons de l'étude sont G4/8 et G10/20. Leurs masses volumiques et leurs dosages dans le béton sont notées respectivement ρ_1 , ρ_2 , et g_1 , g_2 . Quant aux refus obtenu pour chaque tamis, il est noté R_{i1} et R_{i2} . La granulométrie (passant) du mélange sur chacun des tamis est alors donnée par la relation de proportionnalité :

$$r_i = \frac{(g_1 R_{i1} + g_2 R_{i2})}{(g_1 + g_2)} \quad (\text{Rel.4.17})$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\rho_g = \frac{(g_1 \rho_1 + g_2 \rho_2)}{(g_1 + g_2)} \quad (\text{Rel.4.18})$$

2. Masse de chaque tranche granulaire

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur (TM_i) et par un tamis inférieur (T_{mi}). Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM_i et R_{mi} (exprimé en %). Les tamis retenus pour définir les tranches granulaires sont les suivants : 20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm.

La masse M_i de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (R_{mi} - RM_i) \times \frac{(g_1 + g_2)}{100} \quad (\text{Rel.4.19})$$

3. Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche

La taille moyenne d_i de chaque tranche granulaire est donnée par la relation :

$$d_i = \frac{(TM_i + T_{mi})}{2} \quad (\text{Rel.4.20})$$

Avec l'hypothèse d'ellipticité, le volume de chaque particule moyenne est donné par :

$$v_i = \frac{(\pi d_i^3)}{6} \quad (\text{Rel.4.21})$$

et sa surface développée par :

$$s_i = \pi d_i^2 \quad (\text{Rel.4.22})$$

4. Volume de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire

Il est le produit de la masse M_i de la tranche granulaire par le volume massique ω du gravillon :

$$V_i = \omega M_i \quad \text{avec} \quad \omega = 1/\rho_g \quad (\text{Rel.4.23})$$

5. Nombre de particules et surface développée dans chaque tranche granulaire

Le nombre de particules moyennes est égal au rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne. La surface développée est égale au produit de la surface de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$N_i = V_i/v_i \quad \text{et} \quad S_i = N_i s_i \quad (\text{Rel.4.24})$$

6. Surfaces totale du mélange de gravillon

Elle est égale à la somme des surfaces calculées pour chaque tranche :

$$SD = \sum_i S_i \quad (\text{Rel.4.25})$$

La même démarche est appliquée pour le calcul de la surface développée par le sable.

β) - Calcul de la composition du MBE

Les surfaces développées par chaque granulat du béton étant connues, les corrections granulaires du mortier MBE sur le sable sont réalisées. Les taux de corrections s'_i sont calculés de façon à assurer l'équivalence entre les surfaces développées respectivement par les ou les sables présents (sables du MBE) d'une part et par tous les granulats du béton s_1, s_2, g_1 et g_2 d'autres part, selon les relations suivantes :

$$SD (s'_1 - s_1 + s'_2 - s_2) = SD (g_1 + g_2) \quad (\text{Rel.4.26})$$

$$SDs'_1 + SDs'_2 = SDs_1 + SDs_2 + SDg_1 + SDg_2 \quad (\text{Rel.4.27})$$

$$s'_1 = \frac{SDs'_1 \times s_1}{SDs_1} \quad (\text{Rel.4.28})$$

Des fichiers Excel ont été préparés pour le calcul des surfaces développées des constituants de chaque mélange (Tab. 4.1).

Opérations	Symboles	Valeurs															
		0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20
tranches granulaires	Tmin	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20
	Tmax	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
MVR sable (Kg/L)	2,685																
dosage du sable dans le béton (Kg)	1016,747																
masse de chaque tranche granulaire (kg)	Mi (kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,1675	30,50241	264,3542	498,206	203,3494	10,167469
Diamètre de la particule moyenne de chaque tranche	di	0,04	0,12	0,24	0,47	0,94	1,88	2,83	3,58	4,50	5,65	7,15	9,00	11,25	14,25	18,00	22,50
volume de la particule moyenne dans chaque tranche	vi (10 ⁻⁹ m ³)	0,000034	0,000905	0,007014	0,055234	0,435	3,451	11,805	23,924	47,713	94,437	191,389	381,704	745,515	1515,107	3053,628	5964,117
Surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche	si (10 ⁶ m ²)	0,005	0,045	0,177	0,701	2,776	11,045	25,072	40,152	63,617	100,287	160,606	254,469	397,608	637,940	1017,876	1590,431
Volume massique de la matrice du gravillon du mélange	ϕ (10 ⁻³ m ³ /Kg)	0,372439															
volume total des particules moyennes	Vi (10 ⁻³ m ³)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,7868	11,3603	98,4559	185,5516	75,7353	3,7868
nombre de particules moyennes	Ni *(10 ⁶)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,030	0,132	0,122	0,025	0,0006
nombre de particules moyennes	Ni *(10 ⁴)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,979	2,976	13,206	12,247	2,480	0,063
Surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche	Si (m ²)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,1777	7,5735	52,5098	78,1270	25,2451	1,0098
surface développée par 1 Kg de gravier	SD (m ²)	0,165															

Tab.4. 1 : Exemple de calcul de la surface développée du gravillon 10/20 pour le mélange S0A2

Le sable lavé S0 (ou f_3) est celui utilisé pour remplacer les gravillons de chaque mélange. A ce stade, on calcule la quantité de sable lavé ayant la même surface que les gravillons G4/8 et G10/20 du béton. Le choix de remplacer les gravillons par le sable lavé a été fait afin d'éviter une influence parasite des fillers du sable d'apport. Seuls interviennent alors les fillers du sable du béton considéré, ce qui constitue l'approche de notre étude. Le MBE est alors constitué du ciment, de l'eau, de sable et de l'adjuvant éventuel. Le sable est constitué du sable initial S 0/4 et du sable lavé S0 ou des fillers calcaires éventuels (si le sable de mélange contient plus de 16% de fillers).

D'autres fichiers Excel ont été conçus pour le calcul de la composition du MBE. Les masses des différents ingrédients ont été déterminés de telle sorte à avoir un volume fixe de MBE (1 litre) en tenant compte de la présence de superplastifiant, de la teneur en eau et de

l'absorption des granulats. Le Tab. 4.2 donne un exemple d'une fiche de formulation d'un MBE.

	C	E	S0	SC	FC	SP	ES
MVR	3,110	1,000	2,690	2,690	2,700	1,060	1,224
Ab			0,0030	0,0030	0,0030		
ES						0,309	
w							2,236
FC/S			0,018	0,160			
formule (%)			1,00	0,00	0,00		

référence	Formule en masse sèche du MBE						V (l) mortier	Teneur en eau			Masse d'ingrédients en g							
	C	E	S0	SC	FC	SP/L		V	w S0	w SC	w FC	c	e	s0	sc	fc	sp	V
1	353,3	199	827,9	0	0,0	0	620,4	1,000	0,001	0	0	569,51	324,10	1335,19	0,00	0,00	0,00	1,000
2	353,3	199	827,9	0	0,0	0,01	621,3	1,000	0,001	0	0	568,66	319,52	1333,19	0,00	0,00	5,93	1,000
3	353,3	199	827,9	0	0,0	0,02	622,2	1,000	0,001	0	0	567,81	314,95	1331,20	0,00	0,00	11,84	1,000
4	353,3	199	827,9	0	0,0	0,03	623,1	1,000	0,001	0	0	566,96	310,40	1329,21	0,00	0,00	17,73	1,000
5	353,3	199	827,9	0	0,0	0,04	624,1	1,000	0,001	0	0	566,11	305,86	1327,23	0,00	0,00	23,60	1,000
6	353,3	199	827,9	0	0,0	0,05	625,0	1,000	0,001	0	0	565,27	301,34	1325,26	0,00	0,00	29,46	1,000

référence	Eau			Correction d'eau			Rapports initiaux				finaux	
	préhumidification	ajoutée	Eau totale mise	A	Ø	eau +	e/c	e/c+f	sp/c	sp/c+f	e/c	e/c+f
1	17,36	306,74	324,10	11,9	22,38	0,00	0,563	0,540	0,000	0,000	0,563	0,540
2	17,33	197,63	214,96	12,5	30,10	-104,56	0,563	0,540	0,010	0,010	0,379	0,364
3	17,31	185,03	202,34	12,1	29	-112,62	0,563	0,540	0,021	0,020	0,365	0,350
4	17,28	180,53	197,81	11	27,66	-112,59	0,563	0,540	0,031	0,030	0,365	0,350
5	17,25	140,24	157,49	11,8	25	-148,37	0,563	0,540	0,042	0,040	0,301	0,289
6	17,23	145,47	162,70	11,2	27,5	-138,64	0,563	0,540	0,052	0,050	0,318	0,305

Tab.4. 2. : Exemple d'une fiche de formulation du MBE S0A2

4.5.4 Composition des MBE réalisés

La composition des différents mortiers de bétons équivalents a été calculée pour chaque béton d'affaissement intermédiaire (SiA2). Elle est donnée dans le Tab. 4.3.

MBE	Masses des constituants (kg/m ³)					Rapports	
	Ciment	Eau	Sable f3	Sable S0/4	FC	E/C	E/(C+FC)
S0A2	353,3	199	827,9	0	0	0,65	0,54
S6A2	349	193,3	516,4	302,2	0	0,55	0,48
S12A2	351,2	195,9	206	579,3	0	0,56	0,44
S18A2	348,4	203,1	12,1	798,8	19,5	0,58	0,41
S24A2	348,3	207,3	13,1	707,4	74,5	0,6	0,39

Tab.4. 3 : Composition des mortiers de bétons équivalents, en kg/m³

4.5.5 Fabrication des MBE

Les constituants respectifs à chaque MBE ont été, tout d'abord, pesés. La procédure du malaxage et les mesures au mini-cône sont volontairement détaillés ci-après, car elles dérogent quelque peu aux pratiques habituelles.

α) - Malaxage

Il se fait avec un malaxeur à mortier conforme à la norme NF EN 196-1 [NF EN 196-1, 2006]. La pâle du malaxeur doit être réglée à 4.5 mm du fond du bol. Les étapes suivies lors du malaxage du MBE sont les suivantes :

- Introduction du sable plus une quantité d'eau égale à son absorption augmentée de 1% ;
- Malaxage pendant deux minutes à petite vitesse ;
- Repos de 5 minutes tout en protégeant le récipient contre l'évaporation ;
- Introduction du ciment et malaxage pendant 30 secondes à petite vitesse ;
- Introduction de l'eau de gâchage et du superplastifiant (si utilisé), ce qui correspond à t_0 ;
- Malaxage pendant 30 secondes à petite vitesse puis 30 secondes à grande vitesse ;
- Raclage du fond et du pourtour du bol ;
- Malaxage 1 minute à grande vitesse ;

β) Mesures au mini-cône

Le matériel nécessaire est présenté Fig. 4.19 :



Fig. 4. 19 : Matériels utilisés

Le mortier est introduit dans le mini-cône en trois couches d'épaisseurs équivalentes. Chaque couche est piquée 15 fois avec la tige métallique et la surface du cône est arasée. Le cône est alors soulevé lentement et verticalement. L'affaissement est mesuré avec le réglet métallique point le plus haut (Fig. 4.20).

L'étalement est mesuré juste après selon 3 diamètres orthogonaux à l'aide d'un pied à coulisse (Fig. 4.21). La valeur retenue est la moyenne des trois mesures.

Pour chaque mélange, le MBE sans superplastifiant a tout d'abord été réalisé. Les valeurs obtenues sont prises comme référence (Tab. 4.1). De nouveaux MBE ont alors été formulés avec un dosage en SP variant de 0 à 4% de la masse du ciment, par pas progressifs. Des corrections d'eau ont été apportées afin d'obtenir un affaissement égal le plus possible à l'affaissement de référence. En total, 51 MBE ont été ainsi réalisés dont 29 seulement conduisent aux affaissements de référence.



Fig. 4. 20 : Mesure de l'affaissement d'un MBE



Fig. 4. 21 : Mesure de l'étalement d'un MBE

MBE	Mesures	Superplastifiant SP (%)								
		0	0.5	0.75	1	1.5	2	3	4	5
S0A2	A (cm)	11.9	-	-	12.5	-	12.1	11	11.8	11.2
	Ø (cm)	22.4	-	-	30.1	-	29	27.7	25	27.5
S6A2	A (cm)	12.3	-	-	12.9	-	12.6	12.9	12.8	-
	Ø (cm)	18	-	-	29.5	-	26.5	28.8	27.5	-
S12A2	A (cm)	10.6	10.6	11.5	12.2	12.3	11.7	11	10.8	-
	Ø (cm)	16.9	18	19	23	22.5	21	20	26	-
S18A2	A (cm)	10.4	-	-	11.3	-	11	11.8	11.2	-
	Ø (cm)	16.8	-	-	19	-	19	22	20	-
S24A2	A (cm)	8.8	-	-	10.6	-	10.1	10.8	10.8	-
	Ø (cm)	15.3	-	-	17	-	16	17	18	-

Tab. 4.4 : Mesure de l'affaissement et de l'étalement des MBE réalisés

4.5.6 Interprétations des résultats obtenus

Le rapport eau/ciment puis eau/(ciment + fillers) sont tracés en fonction du rapport superplastifiant/ciment puis superplastifiant/(ciment + fillers) (Fig. 4.22 et 4.23). Les fillers sont ceux issus du sable calcaires lavé, du sable complet et de fillers calcaires éventuels.

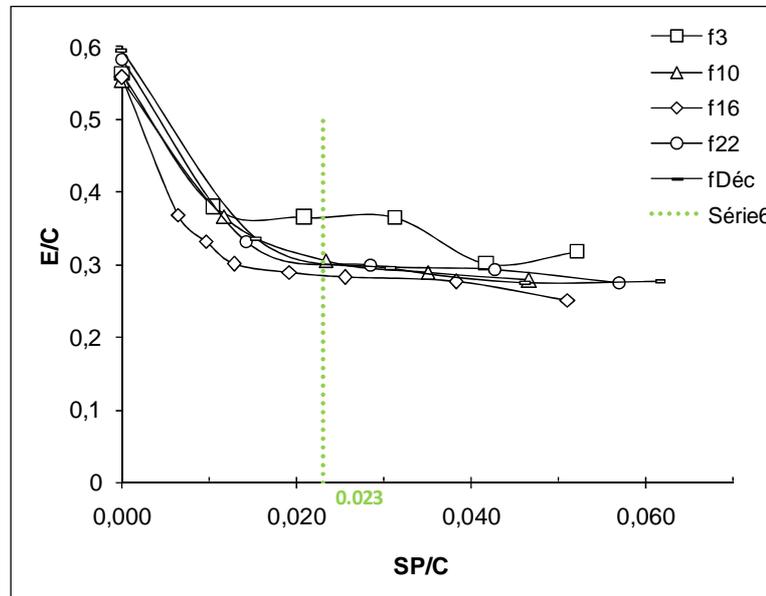


Fig. 4. 22. Relation entre E/C et la dose de superplastifiant pour chaque MBE

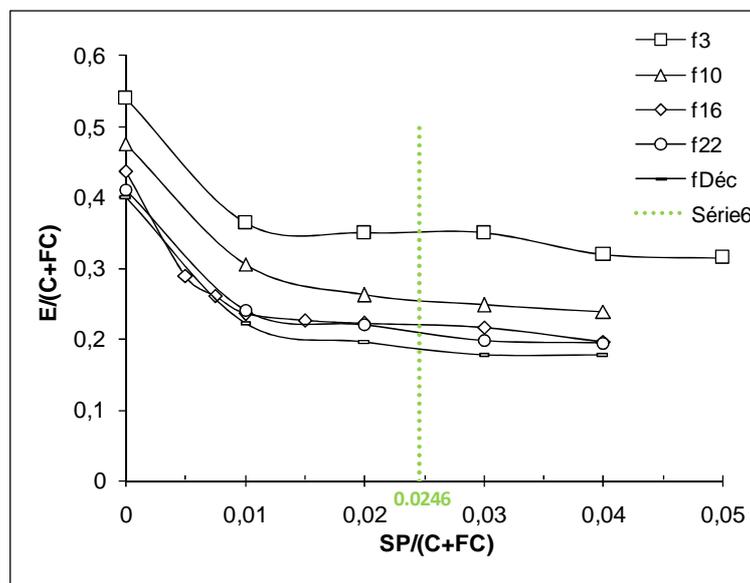


Fig. 4.23. Relation entre E/(C+FC) et la dose de superplastifiant pour chaque MBE

On remarque que les rapports E/C et E/(C+F) diminuent rapidement entre 0 et 1% de SP puis plus lentement avant de devenir quasi-constants. L'ajout de superplastifiant, au-delà d'une certaine valeur, n'a plus l'effet désiré. Cette valeur correspond approximativement à la dose de

saturation du liant trouvée par la méthode de la sonde [Lecomte *et al.*, 2007], dont les valeurs sont rapportées sur les deux graphes concernés. La Fig. 4.24 présente l'ensemble de résultats obtenus pour les mesures d'affaissements des bétons retenus et les étalements de leurs MBE correspondants. L'ajustement linéaire obtenu est globalement satisfaisant.

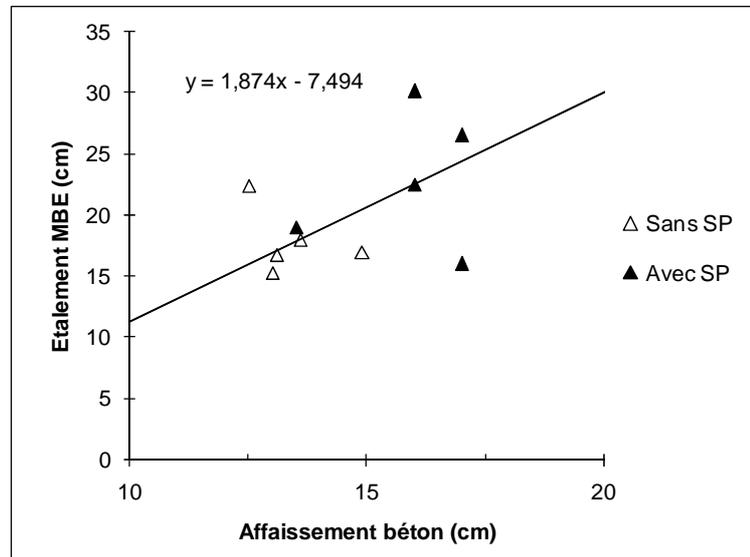


Fig. 4.24. Corrélation entre affaissement des bétons et étalements MBE

4.6 Préparation des matériaux avant gâchage

Les quantités de matériaux nécessaires à chaque gâchée ont été prélevées deux jours à l'avance, homogénéisées et conservées dans des conteneurs hermétiquement fermés. Leur teneur en eau a été mesurée la veille de la fabrication.

Pour les bétons plastiques et fluides, le volume des gâchées est fixé à 40 litres permettant la réalisation des essais d'affaissement ou d'étalement et la confection de cinq éprouvettes cylindriques 16×32 cm. Pour les bétons d'affaissement intermédiaire (bétons très plastiques), le volume des gâchées est supérieur de 25 litres permettant ainsi de couler six éprouvettes cylindriques supplémentaires Ø 7,1× 64 cm (le mode opératoire est détaillé dans le chapitre suivant). Le volume des gâchées est alors de 65 litres.

Le calcul de l'eau efficace doit tenir compte de la teneur en eau mesurée et de l'absorption des granulats. Pour ceci, une fiche expérimentale de formulation (Fig. 4.25) a été établie sous Excel pour chaque mélange caractérisé par une référence et par sa date de fabrication. Elle permet de calculer l'eau de fabrication et les quantités de matériaux humides

nécessaires pour réaliser une gâchée de 1 m³ puis de déterminer les pesées à réaliser pour le volume de gâchée choisi.

L'eau de fabrication n'est pas introduite en une seule fois dans le malaxeur, afin d'éviter l'écueil d'un mélange trop fluide. Inversement, si l'affaissement mesuré ne correspond pas à celui désiré, des quantités d'eau supplémentaires peuvent être ajoutées. Ces modifications sont prises en compte dans le calcul de l'eau efficace afin de retrouver a posteriori les masses finales sèches pour 1 m³ de béton. Cette fiche est aussi conçue pour noter les propriétés des mélanges à l'état frais et durci.

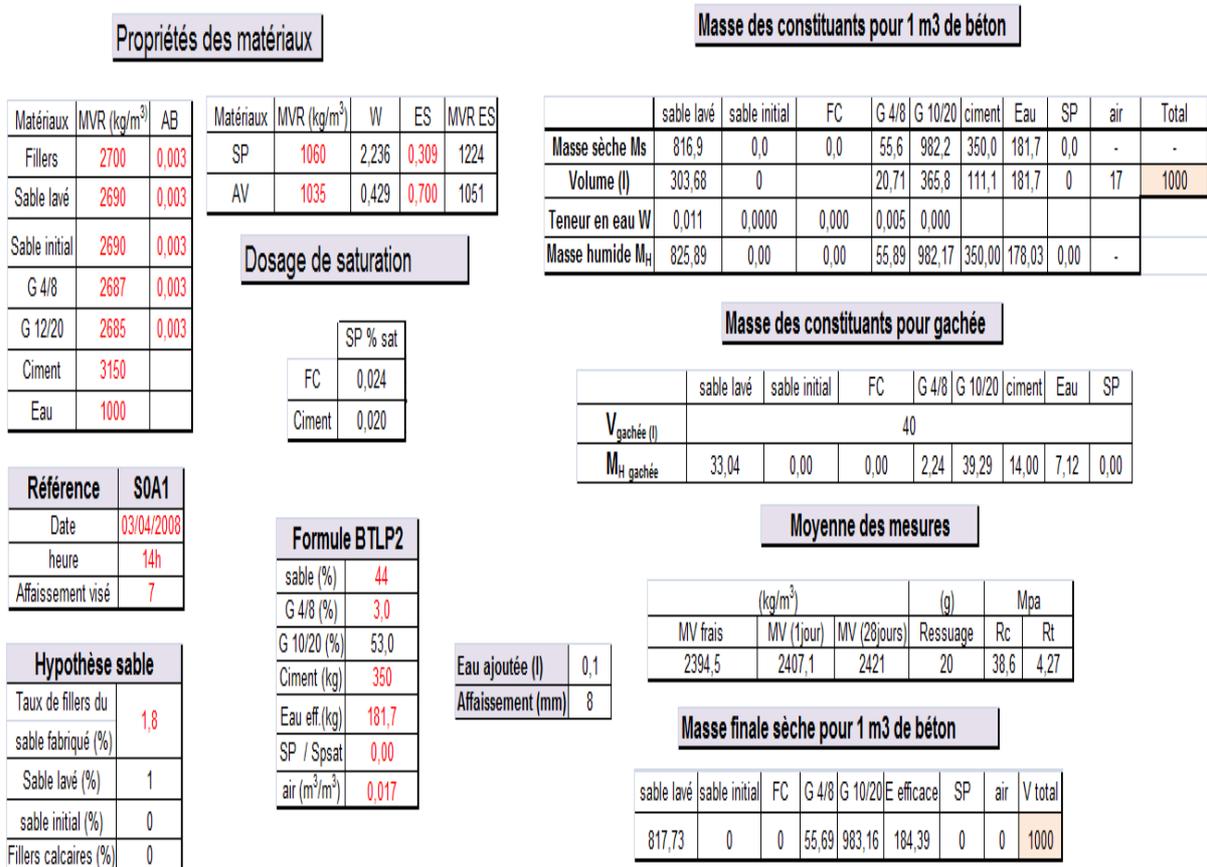


Fig.4. 25 : Exemple d'une fiche de formulation

4.7 Fabrication des bétons

4.7.1 Calcul des formules

Les formules optimisées des mélanges à réaliser, trouvées par le logiciel BétonlabPro2 sont saisies dans la fiche sous une référence de la forme SiAj. Les quantités étant exprimées en % pour le squelette granulaire, en kg/m³ pour les autres constituants et en m³/m³ pour l'air.

1ère étape : Calcul du volume solide

A partir de la formule donnée par BétonlabPro2, on calcule le volume solide V_{solide} par la Rel. 4.29 en tenant compte du volume d'air a , du volume d'eau V_{eau} et du volume de superplastifiant V_{SP} .

$$V_{solide} = 1000 - a - V_{eau} - V_{SP} \quad (\text{Rel. 4.29})$$

Rappelons que le volume d'air piégé des mélanges, noté a , est calculé par la Rel. 4.8.

2ème étape : Calcul des masses sèches pour 1 m³ de béton

A partir de la formule donnée par BétonlabPro2, des masses volumiques des matériaux et du volume solide, on calcule, pour chaque matériau, la masse sèche M_s en kg/m³ (Rel. 4.30).

$$M_s = \% \text{ granulat} \times V_{Solide} \times MVR_{granulat} \quad (\text{Rel. 4.30})$$

Pour le sable, le pourcentage donné par le squelette granulaire est celui du sable fabriqué (exemple de la Fig. 4.2). Donc, il faut définir, d'abord, les pourcentages des fractions qui le constituent, à savoir le sable initial ($S_{initial}$), le sable lavé ($S_{lavé}$) et les fillers calcaires (FC) d'apport (Rel. 4.31). Ensuite, on procède de la même manière pour trouver leurs masses sèches.

$$S_i = x\% S_{initial} + y\% S_{lavé} + z\% FC \quad (\text{Rel. 4.31})$$

3ème étape : Calcul des masses humides pour 1 m³ de béton

En tenant compte de la teneur en eau (W), on calcule, pour chaque matériau, la quantité humide M_H en kg/m³ en utilisant la Rel. 4.32.

$$M_H = M_S \times (1+W) \quad (\text{Rel. 4.32})$$

4ème étape : Calcul des masses humides pour un volume de gâchée donné

En fixant le volume de la gâchée désirée V_g , on trouve la masses humide de chaque constituant par une règle de proportionnalité.

$$M_{H \text{ gachée}} = M_H \times \frac{V_g}{1000} \quad (\text{Rel. 4.33})$$

5ème étape : Calcul de l'eau efficace

L'eau efficace ($E_{efficace}$) correspond à la quantité d'eau mise en œuvre ($E_{fabrication}$) à laquelle on ajoute l'eau apportée par les granulats ($E_{apportée}$) moins l'eau absorbée par les

granulats ($E_{\text{absorbée}}$). On suppose ici que l'absorption des granulats est satisfaite dans les premières minutes du gâchage. On tient compte aussi, le cas échéant de l'eau apportée par le superplastifiant (E_{SP}).

$$E_{\text{efficace}} = E_{\text{fabrication}} + E_{\text{apportée}} - E_{\text{absorbée}} + E_{\text{ajoutée}} + E_{\text{SP}} \quad (\text{Rel. 4.34})$$

avec

$$E_{\text{eau apportée}} = M_{\text{FC}} \times W_{\text{FC}} + \sum (M_{\text{Si}} \times W_{\text{Si}}) + M_{\text{G4/8}} \times W_{\text{G4/8}} + M_{\text{G10/20}} \times W_{\text{G10/20}} \quad (\text{Rel. 4.35})$$

et

$$E_{\text{eau absorbée}} = M_{\text{FC}} \times Ab_{\text{FC}} + \sum (M_{\text{Si}} \times Ab_{\text{Si}}) + M_{\text{G4/8}} \times Ab_{\text{G4/8}} + M_{\text{G10/20}} \times Ab_{\text{G10/20}} \quad (\text{Rel. 4.36})$$

6ème étape : Prise en compte de l'eau réellement utilisée

S'il existe un excès ou un déficit d'eau Δe par rapport à l'eau efficace prévisionnelle, le volume réel des constituants est alors ramené au volume unité par une règle de proportionnalité, (Rel. 4.37).

$$V_{\text{constituant corrigé}} = \frac{V_{\text{constituant initial}}}{1 + \Delta e} \quad (\text{Rel. 4.37})$$

7ème : Calcul de la masse volumique théorique initiale

La masse volumique théorique initiale $MV_{\text{th-init}}$ du béton (sans air) correspond au rapport de la masse des constituants prévus dans la formule sur leur volume réel.

8ème étape : Calcul de la masse volumique théorique finale

La masse volumique théorique des bétons effectivement réalisés MV_{th} a été déduite de la masse volumique initialement calculée $MV_{\text{th-init}}$ et de la correction d'eau Δe apportée sur la gâchée de volume Vg , selon la relation :

$$MV_{\text{th}} = \frac{MV_{\text{th-init}} + \Delta e/Vg}{1 + \Delta e/Vg} \quad (\text{Rel. 4.38})$$

9ème étape : calcul de la masse volumique expérimentale

La masse volumique expérimentale des bétons frais MV_{fr} est la moyenne des rapports obtenus des masses des éprouvettes par leurs volumes correspondants.

10ème étape : Air occlus

Le volume d'air occlus expérimental a_{exp} dans le volume unité, exprimé en litres, est calculé par comparaison de la masse volumique mesurée à l'état frais, MV_{fr} , et de la masse volumique théorique (sans air) MV_{th} , selon la relation :

$$a_{exp} = 1000 \left(1 - \frac{MV_{fr}}{MV_{th}} \right) \quad (\text{Rel. 4.39})$$

11ème étape : calcul des masses finales sèches pour 1 m³ de béton

L'air occlus a_{exp} permet de recalculer les proportions pondérales réelles des constituants dans la formule finale de béton [Lecomte, 1998] Les masses finales sèches obtenues pour 1 m³ de béton seront donc ajustées en tenant compte de la correction d'eau effectuée.

4.7.2 Fiches expérimentales des mélanges

Les fiches expérimentales suivantes regroupent les formulations obtenues pour chaque type de béton formulé à partir des sables reconstitués et pour les différents affaissements réalisés. Ces bétons sont notés SiAj, i étant le pourcentage de fines et j la valeur de l'affaissement choisi. Les bétons superplastifiés sont référenciés de la même manière suivie de la mention SP (SiAj-SP). Pour un même mélange réalisé avec différents dosages en superplastifiant, ce mélange sera noté SiAj-SPi. Les propriétés mesurées sur les matériaux, rappelées ci-dessous, ont été retenues pour tous les mélanges, avec et sans superplastifiant.

Propriétés des matériaux

Matériaux	MVR (kg/m ³)	AB	Matériaux	MVR (kg/m ³)	W	ES	MVR ES
Fillers	2700	0,003	SP	1060	2,236	0,309	1224
Sable lavé	2690	0,003	AV	1035	0,429	0,700	1051
Sable initial	2690	0,003					
G 4/8	2687	0,003					
G 12/20	2685	0,003					
Ciment	3150						
Eau	1000						

Dosage de saturation

	SP % sat
FC	0,024
Ciment	0,020

α) - Bétons sans superplastifiant

• **S0Ai**

Références					Hypothèse / sable			Formule BTL P2						Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers calcaires	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
03/04/2008	14h	S0A1	7	0.018	1,00	0,00	0,00	44	3	53	350	181,7	0,00	0,017	690,2	816,9	0,0	0,0	55,6	982,2	350,0	181,7	0	1000
04/04/2008	13h	S0A2	15	0.018	1,00	0,00	0,00	44	3	53	350	193	0,00	0,013	682,9	808,3	0,0	0,0	55,0	971,8	350,0	193,0	0	1000
03/04/2008	13h	S0A3	23	0.018	1,00	0,00	0,00	44	3	53	350	216	0,00	0,009	663,9	785,8	0,0	0,0	53,5	944,7	350,0	216,0	0	1000

teneur en eau des granulats		V gaché (litres)		Masses humide des constituants (kg)										Eau ajoutée (l)		Affaissement (cm)				
Référence	Sable lavé	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	S0A1	S0A2	S0A3	S0A1	S0A2	S0A3	
S0A1	0,011	0,000	0,0045	0,0000	0,000	40	33,04	0,00	0,00	2,24	39,29	14,00	7,12	0	0	0	0,1	8		
S0A2	0,009	0,000	0,0045	0,0015	0,000	65	53,01	0,00	0,00	3,59	63,26	22,75	12,32	0	0	0	0,27	12,5		
S0A3	0,011	0,000	0,0045	0,0000	0,000	40	31,78	0,00	0,00	2,15	37,79	14,00	8,50	0	0	0	0,2	20		

Moyenne des mesures					
(kg/m³)			(g)		Mpa
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Ressuage	Rc	Rt
2394,5	2407,1	2420,8	20,0	38,6	4,27
2390,0	2404,9	2445,1	35,0	36,2	3,20
2357,8	0,0	2348,6	72,0	21,3	2,76

• **S6Ai**

Références					Hypothèse / sable			Formule BTL P2						Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers calcaires	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
11/04/2008	13h	S6A1	7	0.071	0,63	0,37	0,00	44	4	52	350	181,3	0,00	0,017	690,6	510,9	306,5	0,0	74,2	964,2	350,0	181,3	0	1000
15/04/2008	14h	S6A2	15	0.071	0,63	0,37	0,00	44	4	52	350	193,5	0,00	0,013	682,4	504,8	302,9	0,0	73,3	952,8	350,0	193,5	0	1000
11/04/2008	14h	S6A3	23	0.071	0,63	0,37	0,00	44	4	52	350	218	0,00	0,009	661,9	489,6	293,8	0,0	71,1	924,1	350,0	218,0	0	1000

teneur en eau des granulats		V gaché (litres)		Masses humide des constituants (kg)										Eau ajoutée (l)		Affaissement (cm)				
Référence	Sable lavé	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	S6A1	S6A2	S6A3	S6A1	S6A2	S6A3	
S6A1	0,002	0,002	0,00	0,00	0,00	40	20,48	12,29	0,00	2,97	38,57	14,00	7,41	0	0	0	0,1	7		
S6A2	0,025	0,002	0,00	0,00	0,00	60	31,05	18,21	0,00	4,40	57,17	21,00	11,15	0	0	0	0,05	13,6		
S6A3	0,002	0,002	0,00	0,00	0,00	40	19,62	11,77	0,00	2,85	36,97	14,00	8,87	0	0	0	0,1	21,3		

Moyenne des mesures					
(kg/m³)			(g)		Mpa
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Ressuage	Rc	Rt
2405,8	2419,3	2432,4	28,0	48,3	3,67
2381,6	2398,3	2412,2	31,3	40,2	2,71
2360,2	2393,2	2400,9	78,3	33,1	2,26

• **S12Ai**

Références					Hypothèse / sable			Formule BTL P2						Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers calcaires	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
12/04/2008	13h	S12A1	7	0.125	0,25	0,75	0,00	42	3	55	350	182,5	0,00	0,015	691,4	195,3	585,8	0,0	55,7	1021	350,0	182,5	0	1000
14/04/2008	13h	S12A2	15	0.125	0,25	0,75	0,00	42	3	55	350	195,2	0,00	0,012	681,7	192,5	577,6	0,0	55,0	1007	350,0	195,2	0	1000
12/04/2008	14h	S12A3	23	0.125	0,25	0,75	0,00	42	3	55	350	218	0,00	0,008	662,9	187,2	561,7	0,0	53,4	978,9	350,0	218,0	0	1000

teneur en eau des granulats		V gaché (litres)		Masses humide des constituants (kg)										Eau ajoutée (l)		Affaissement (cm)				
Référence	Sable lavé	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	S12A1	S12A2	S12A3	S12A1	S12A2	S12A3	
S12A1	0,053	0,002	0,00	0,00	0,000	40	8,23	23,48	0,00	2,23	40,84	14,00	7,06	0	0	0	0,1	7,6		
S12A2	0,053	0,002	0,00	0,00	0,000	65	13,18	37,62	0,00	3,57	65,43	22,75	12,31	0	0	0	0	14,9		
S12A3	0,053	0,002	0,00	0,00	0,000	40	7,89	22,51	0,00	2,14	39,16	14,00	8,49	0	0	0	0,15	21,4		

Moyenne des mesures					
(kg/m³)			(g)		Mpa
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Ressuage	Rc	Rt
2406,7	2429,7	2447,7	23,0	44,7	3,18
2390,9	2402,8	2412,2	25,0	42,2	3,17
2357,4	2394,1	2407,1	35,0	34,5	2,70

• **S18Ai**

Références				Hypothèse / sable				Formule BTLP2						Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers calcaires	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff., (kg)	SP	Volume total
18/04/2008	14h	S18A1	7	0,180	0,00	0,98	0,02	45,4	4	50,87	350	189,1	0,00	0,017	682,8	0,0	813,7	19,9	68,8	932,6	350,0	189,1	0	1000
21/04/2008	13h	S18A2	15	0,180	0,00	0,98	0,02	45,4	4	50,87	350	201,4	0,00	0,014	673,5	0,0	802,6	19,6	67,9	919,9	350,0	201,4	0	1000
18/04/2008	13h	S18A3	23	0,180	0,00	0,98	0,02	45,4	4	50,87	350	224,8	0,00	0,010	654,1	0,0	779,4	19,1	65,9	893,4	350,0	224,8	0	1000

Référence	teneur en eau des granulats					V gâché (litres)	Masses humide des constituants (kg)							Eau ajoutée (l)		Affaissement (cm)				
	Sable lavé	Sable complet	4/8	10/20	Fillers		Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	S18A1	S18A2	S18A3			
	0,000	0,0020	0,00	0,00	0,100		40	0,00	32,61	0,88	2,75	37,30	14,00	7,64	0	0	0,16	0,05		
S18A1	0,000	0,0020	0,00	0,00	0,100	40	0,00	32,61	0,88	2,75	37,30	14,00	7,64	0	2384,4	2393,7	2403,3	17,5	43,0	2,82
S18A2	0,000	0,0025	0,00	0,00	0,023	60	0,00	48,27	1,21	4,07	55,19	21,00	12,26	0	2364,6	2377,9	2385,0	26,7	40,8	3,03
S18A3	0,000	0,0020	0,00	0,00	0,100	40	0,00	31,24	0,84	2,64	35,74	14,00	9,06	0	2341,7	2368,6	2369,6	46,7	33,5	2,23

• **S24Ai**

Références				Hypothèse / sable				Formule BTLP2						Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers calcaires	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff., (kg)	SP	Volume total
21/04/2008	16h	S24A1	7	0,240	0,00	0,90	0,10	43,6	7	49,9	350	193,3	0,00	0,016	679,6	0,0	720,3	76,1	119,6	910,5	350,0	193,3	0	1000
22/04/2008	13h	S24A2	15	0,240	0,00	0,90	0,10	43,6	7	49,9	350	205,5	0,00	0,013	670,4	0,0	710,6	75,1	118,0	898,2	350,0	205,5	0	1000
19/04/2008	15h	S24A3	23	0,240	0,00	0,90	0,10	43,6	7	49,9	350	228,9	0,00	0,009	651,0	0,0	690,0	72,9	114,6	872,2	350,0	228,9	0	1000

Référence	teneur en eau des granulats					V gâché (litres)	Masses humide des constituants (kg)							Eau ajoutée (l)		Affaissement (cm)				
	Sable lavé	Sable complet	4/8	10/20	Fillers		Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	S24A1	S24A2	S24A3			
	0,000	0,0030	0,00	0,00	0,023		40	0,00	28,90	3,11	4,78	36,42	14,00	7,80	0	0	0,17	0,2		
S24A1	0,000	0,0030	0,00	0,00	0,023	40	0,00	28,90	3,11	4,78	36,42	14,00	7,80	0	2382,8	2395,0	2400,2	11,0	43,8	2,90
S24A2	0,000	0,0028	0,00	0,00	0,026	60	0,00	42,75	4,62	7,08	53,89	21,00	12,42	0	2361,1	2369,7	2379,4	25,0	39,8	2,92
S24A3	0,000	0,0030	0,00	0,00	0,072	40	0,00	27,68	3,13	4,58	34,89	14,00	9,07	0	2334,7	2356,9	2374,3	26,0	29,8	2,55

β) Bétons avec superplastifiant

• **S0Ai-SP**

Références				Hypothèse / sable				Formule BTLP2						Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apport	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff., (kg)	SP	Volume total
01/05/2009	13h	S0A2-SP	15	0,018	1,00	0,00	0,00	44	3	53	350	160	0,66	0,013	714,7	845,9	0,0	0,0	57,6	1017,0	350,0	160,0	4,861	1000
28/04/2009	12h	S0A3-SP	23	0,018	1,00	0,00	0,00	44	3	53	350	170	0,66	0,009	708,7	838,8	0,0	0,0	57,1	1008,5	350,0	170,0	4,859	1000

Référence	teneur en eau des granulats					V gâché (litres)	Masses humide des constituants (kg)							(litres)		(cm)			
	Sable complet	Sable complet	4/8	10/20	Fillers		Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	Eau restante	Eau mise	Affaissement		
	0,0238	0,0000	0,002	0,002	0,0		60	51,96	0,00	0,00	3,47	61,16	21,00	8,384	0,292	1,38	7	16	
S0A2-SP	0,0238	0,0000	0,002	0,002	0,0	60	51,96	0,00	0,00	3,47	61,16	21,00	8,384	0,292	2478,6	2464,4	2466,6	62,9	4,5
S0A3-SP	0,001	0,0102	0,002	0,002	0,0	40	33,58	0,00	0,00	2,29	40,43	14,00	6,760	0,194	2456,0	2449,5	2464,4	54,1	3,2

• **S6Ai-SP**

Références		Hypothèse / sable					Formule BTL P2							Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apport	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spstat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
28/04/2009	13h30	S6A2-SP	15	0,0713	0,62	0,38	0,00	44	4	52	350	160	0,66	0,013	714,5	528,2	317,4	0,0	76,8	997,6	350,0	160,0	5,575	1000
24/04/2009	13h	S6A3-SP	23	0,0713	0,62	0,38	0,00	44	4	52	350	170	0,66	0,009	708,5	523,8	314,8	0,0	76,1	989,2	350,0	170,0	5,567	1000

teneur en eau des granulats		Masses humide des constituants (kg)										(litres)		(cm)			
Sable complet	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	V gâché (litres)	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	Eau restante	Eau mise	Affaissement	
S6A2-SP	0,001	0,0102	0,002	0,002	0,0000	60	31,73	19,24	0,00	4,62	59,99	21,00	9,337	0,335	2,59	6,75	17
S6A3-SP	0,024	0,0102	0,002	0,002	0,0000	38	20,38	12,08	0,00	2,90	37,68	13,30	5,839	0,212	1,09	4,75	21

Moyenne des mesures				
(kg/m³)				MPa
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Rc	Rt
2523,0	2482,0	2495,9	83,2	4,8
2481,0	2480,6	2491,9	64,0	4,6

• **S12Ai-SP**

Références		Hypothèse / sable					Formule BTL P2							Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apport	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spstat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
23/04/2009	11h	S12A2-SP	15	0,1250	0,25	0,75	0,00	42	3	55	350	160	0,66	0,012	715,3	199,2	609,0	0,0	57,7	1056,3	350,0	160,0	6,220	1000
17/04/2009	14h	S12A3-SP	23	0,1250	0,25	0,75	0,00	42	3	55	350	170	0,66	0,008	709,3	197,5	603,9	0,0	57,2	1047,5	350,0	170,0	6,200	1000

teneur en eau des granulats		Masses humide des constituants (kg)										(litres)		(cm)			
Sable complet	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	V gâché (litres)	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	Eau restante	Eau mise	Affaissement	
S12A2-SP	0,001	0,0102	0,002	0,002	0,0000	60	11,96	36,91	0,00	3,47	63,53	21,00	9,147	0,373	2,90	6,25	16
S12A3-SP	0,001	0,0102	0,002	0,002	0,0000	40	7,91	24,40	0,00	2,29	42,00	14,00	6,500	0,248	1,50	5	21,4

Moyenne des mesures				
(kg/m³)				MPa
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Rc	Rt
2515,0	2482,0	2484,1	78,9	5,8
2476,4	2470,6	2478,1	59,0	5,8

• **S18Ai-SP**

Références		Hypothèse / sable					Formule BTL P2							Masses des constituants pour 1 m3										
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apport	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spstat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
16/04/2009	13H08	S18A2-SP	15	0,18	0,00	0,98	0,02	45,38	3,75	50,9	350	160	0,66	0,014	713,1	0,0	849,8	20,8	71,9	974,0	350,0	160,0	7,103	1000
16/04/2009	14H30	S18A3-SP	23	0,18	0,00	0,98	0,02	45,38	3,75	50,9	350	170	0,66	0,010	707,1	0,0	842,6	20,6	71,2	965,8	350,0	170,0	7,082	1000

teneur en eau des granulats		Masses humide des constituants (kg)										(litres)		(cm)			
Sable complet	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	V gâché (litres)	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	Eau restante	Eau mise	Affaissement	
S18A2-SP	0,000	0,0102	0,002	0,002	0,0037	60	0,00	51,50	1,25	4,32	58,58	21,00	8,980	0,426	1,08	7,9	13,5
S18A3-SP	0,000	0,0102	0,002	0,002	0,0037	40	0,00	34,05	0,83	2,86	38,72	14,00	6,389	0,283	0,62	5,77	23,4

Moyenne des mesures				
(kg/m³)				MPa
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Rc	Rt
2500,0	2462,0	2472,5	72,8	4,4
2460,0	2441,1	2448,0	61,9	4,5

• **S24Ai-SP**

Références		Hypothèse / sable			Formule BTL2							Masses des constituants pour 1 m3												
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apport	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
22/04/2009	13h	S24A2	15	0,24	0,00	0,90	0,10	43,55	6,55	49,9	350	160	0,66	0,013	713,9	0,0	756,7	79,9	125,6	956,5	350,0	160,0	7,804	1000
17/04/2009	13h	S24A3-SP1	23	0,24	0,00	0,90	0,10	43,55	6,55	49,9	350	170	0,66	0,009	707,9	0,0	750,3	79,3	124,6	948,5	350,0	170,0	7,777	1000

teneur en eau des granulats					Masses humide des constituants (kg)							(litres)				(cm)	
Sable complet	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	V gâché (litres)	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	Eau restante	Eau mise	Affaissement	Etalement
S24A2	0,001	0,0102	0,002	0,0030	60	0,00	45,86	4,81	7,56	57,53	21,00	8,992	0,468	0,65	8,34	17	-
S24A3-SP1	0,001	0,0102	0,002	0,0030	40	0,00	30,32	3,18	5,00	38,03	14,00	6,397	0,311	0,507	5,89	22	< 65

Moyenne des mesures					
(kg/m³)			MPa		
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Rc	Rt	
2479,5	2474,7	2485,2	68,7	5,6	
2456,6	2449,8	2454,8	60,6	5,7	

• **S24A3-SPi**

Références		Hypothèse / sable			Formule BTL2							Masses des constituants pour 1 m3												
date	heure	Référence	Affaissement visé (cm)	Taux fillers sable	Sable lavé	Sable complet	Fillers d'apport	sable (%)	G 4/8 (%)	G 10/20 (%)	Ciment (kg)	Eau eff. (kg)	SP / Spsat	air (m³/m³)	Volume solide	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	G10/20	Ciment	Eau Eff. (kg)	SP	Volume total
01/05/2009	11h	S24A3-SP2	23	0,24	0,00	0,90	0,10	43,55	6,55	49,9	350	154	1,00	0,016	716,4	0,0	759,3	80,2	126,1	959,8	350,0	153,5	11,841	1000
29/04/2009	13h	S24A3-SP3	23	0,24	0,00	0,90	0,10	43,55	6,55	49,9	350	138	1,33	0,018	728,9	0,0	772,6	81,6	128,3	976,6	350,0	138,0	15,861	1000
29/04/2009	14h	S24A3-SP4	23	0,24	0,00	0,90	0,10	43,55	6,55	49,9	350	127	1,66	0,020	737,4	0,0	781,5	82,6	129,8	987,9	350,0	126,5	19,892	1000

teneur en eau des granulats					Masses humide des constituants (kg)							(litres)				(cm)		
Sable complet	Sable complet	4/8	10/20	Fillers	V gâché (litres)	Sable complet	Sable complet	Fillers d'apports	G 4/8	10/20	Ciment	Eau Fabrication	SP	Eau restante	Eau ajoutée	Eau mise	Affaissement	Etalement
S24A3-SP2	0,000	0,0102	0,002	0,0030	40	0,00	30,68	3,22	5,06	38,48	14,00	5,623	0,474	0,32	0	5,3	22	< 65
S24A3-SP3	0,000	0,0102	0,002	0,0030	40	0,00	31,22	3,27	5,14	39,15	14,00	4,888	0,634	-	0,11	5,0	23,5	67
S24A3-SP4	0,001	0,0102	0,002	0,0030	40	0,00	31,58	3,31	5,20	39,61	14,00	4,315	0,796	-	0,69	5,0	24,35	73

Moyenne des mesures					
(kg/m³)			MPa		
MV frais	MV (1jour)	MV (28jours)	Rc	Rt	
2474,8	2472,5	2478,0	67,1	5,2	
2491,7	2463,6	2481,9	72,6	4,8	
2470,0	2458,1	2475,9	57,4	4,4	

Temps d'écoulement
2,11 secondes (S24A3-SP4)

4.7.3 Réalisation des gâchées

Après avoir pesé les matériaux nécessaires pour la réalisation d'une gâchée, le mélange est réalisé en introduisant tout d'abord les granulats et le ciment dans le malaxeur, suivi d'un malaxage d'une minute. L'eau est ensuite introduite progressivement, appareil en marche. Le malaxage dure encore deux minutes. Pour les mélanges nécessitant l'ajout de fillers, ces produits ont été mis en suspension dans une partie de l'eau de gâchage pour assurer une bonne dispersion.

L'affaissement au cône d'Abrams [NF EN 12350-2, 1999] a été mesuré sitôt le béton malaxé (deux mesures). S'il était plus faible que prévu, une petite quantité d'eau a été ajoutée

avant de refaire une mesure d'affaissement après malaxage d'une minute. L'opération est reconduite si nécessaire jusqu'à atteindre la consistance désirée. La Fig. 4.26 montre un exemple de mesure d'affaissement au cône d'Abrams.

Le béton est ensuite coulé dans cinq moules cylindriques PVC 16×32 cm soigneusement remplis, vibrés et arasés, et nettoyés avant d'être pesés. La moyenne des mesures sert à déterminer la masse volumique expérimentale du béton frais réalisé. Les moules ont été préalablement numérotés et pesés vides. Les bétons dans les moules ont été vibrés en deux couches à l'aiguille vibrante, pour évacuer le maximum de bulles d'air (temps de vibration adapté visuellement à la consistance). Notons que le remplissage et le talochage des moules n'a pas posé de problème particulier, y compris pour les bétons les plus riches en fillers (Fig. 4.27). Par contre, pour certains bétons à différents dosage en SP (S24A3-SP3 et S24A3-SP4), quelques problèmes de mise en œuvre et de démoulage ont été observés.



Fig. 4.26: Exemple de mesure d'affaissement au cône d'Abrams



Fig. 4.27 : Moules remplis

Après une heure, l'eau de ressuage a été délicatement éliminée avec une éponge et les moules ont été une nouvelle fois pesés. Le phénomène de ressuage a été suivi uniquement pour les bétons sans superplastifiant.

Les éprouvettes ont été démoulées à 24 heures à l'aide d'un compresseur. Chaque éprouvette porte le même numéro du moule, la référence du mélange et la date de sa fabrication. La Fig. 4.28 illustre l'étape de démoulage. Les éprouvettes ont été pesées une nouvelle fois, pour connaître la masse volumique expérimentale des différents bétons à 1 jour. Elles ont été placées ensuite sous eau à 20°C jusqu'au moment des essais à 28 jours (Fig. 4.29).

Arrivée échéance, les éprouvettes sont sortie de l'eau, essuyées et pesées une dernière fois afin de déterminer la densité des bétons à 28 jours. Enfin, les éprouvettes destinées à l'essai de compression (3 spécimens) ont été surfacée au soufre. Les autres (2 spécimens) ont subi l'essai de fendage.



Fig. 4.28. Démoulage des éprouvettes

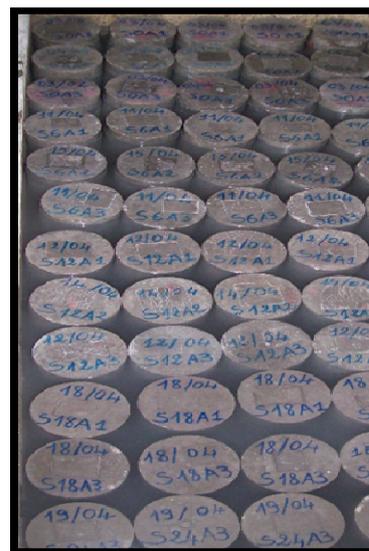


Fig. 4.29. Conservation des éprouvettes sous eau

4.7.4 Bétons sans superplastifiant

Pour chaque mélange, le squelette granulaire optimisé par le logiciel BetonlabPro2 a été retenu. Le dosage en ciment de ces bétons est initialement de 350 kg/m^3 .

La quantité d'eau efficace de chaque béton a été déterminée avec l'option « optimiser », en fixant comme contrainte des affaissements théoriques égaux respectivement à 7 cm, 15 cm et 23 cm. Ainsi, pour chaque type de sable, un béton plastique, un béton très plastique et un

béton fluide ont été conçus [NF P 18-305, 1996], soit quinze mélanges au total. Ces bétons correspondent respectivement à des bétons de classe de consistance S2, S3 et S4 (ou S5) selon la norme [EN 206-1, 2004]. Le Tab. 4.5 indique les classes de consistance des bétons selon la norme française [NF P 18-305, 1996] et la norme européenne [EN 206-1, 2004].

Les bétons formulés à partir des sables reconstitués sont notés SiAj, i étant le pourcentage de fines et j la valeur d'affaissement choisi. La composition des bétons courants est donnée Tab. 4.6. Le nombre total d'éprouvettes 16×32 cm réalisées s'élève à 75.

Pour les bétons plastiques, six éprouvettes supplémentaires de diamètre 7,1cm et de longueur 64cm ont été coulées pour les mesures des variations dimensionnelles, soit un nombre total de 30 éprouvettes.

NF 18-305			EN 206	
Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)	Classe de consistance	Affaissement (cm)
Ferme	0 à 4	± 1	S1	1 à 4
Plastique	5 à 9	± 2	S2	5 à 9
Très plastique	10 à 15	± 3	S3	10 à 15
Fluide	16		S4	16 à 21
			S5	≥ 22

Tab. 4.5. Classes de consistance des bétons en fonction de l'affaissement, selon NF 18-305 et EN 206-1.

	Sable lavé	Sable complet	FC	4/8	10/20	Ciment	Eau Efficace
S0A1	817,7	0,0	0,0	55,7	983,2	350,4	184,4
S0A2	810,4	0,0	0,0	55,2	974,3	350,9	197,7
S0A3	786,5	0,0	0,0	53,6	945,7	350,3	221,2
S6A1	513,6	308,2	0,0	74,6	969,4	351,9	184,8
S6A2	504,6	302,7	0,0	73,3	952,3	349,8	194,2
S6A3	491,3	294,8	0,0	71,4	927,3	351,2	221,3
S12A1	196,1	588,4	0,0	56,0	1025,5	351,5	185,8
S12A2	193,2	579,7	0,0	55,1	1010,2	351,2	195,9
S12A3	187,4	562,3	0,0	53,5	980,0	350,4	222,0
S18A1	0,0	815,3	20,0	68,9	934,4	350,7	189,5
S18A2	0,0	801,8	19,6	67,8	919,0	349,7	203,9
S18A3	0,0	780,7	19,1	66,0	894,8	350,6	226,4
S24A1	0,0	722,6	76,3	120,0	913,4	351,1	193,9
S24A2	0,0	710,1	75,0	117,9	897,6	349,8	208,2
S24A3	0,0	690,2	72,9	114,6	872,5	350,1	234,0

Tab. 4.6. Composition des bétons courants, en Kg/m³

4.7.5 Bétons avec superplastifiant

Les mélanges très plastiques et fluides, réalisés sans superplastifiant, ont été reconduits en présence de superplastifiant. Le dosage en superplastifiant retenu est égal à 2/3 de la dose de saturation en SP *du ciment et des fillers*. Des nouvelles simulations à l'aide du logiciel BétonlabPro2 ont permis alors de trouver le dosage en eau efficace pour chaque mélange (taux de fines) et pour les deux consistances prévisionnelles retenues.

Pour cette campagne d'essais, 50 éprouvettes (16×32 cm) et 30 éprouvettes cylindriques (7,1×64 cm) ont été coulées. Ces dernières servent pour les mesures des variations dimensionnelles. La composition des bétons, avec superplastifiant, est donnée par le Tab. 4.7.

	Sable lavé	Sable complet	FC	4/8	10/20	Ciment	Eau Efficace	SP
S0A2-SP	859	0	0	58	1033	355	139	4,936
S0A3-SP	846	0	0	58	1017	353	127	4,901
S6A1-SP	546	328	0	79	1031	362	121	5,760
S6A2-SP	534	321	0	78	1008	357	144	5,671
S12A2-SP	205	626	0	59	1087	360	115	6,398
S12A3-SP	201	613	0	58	1064	355	135	6,304
S18A2-SP	0	871	21	74	998	359	146	7,281
S18A3-SP	0	852	21	72	976	354	156	7,161
S24A2-SP	0	768	81	128	971	355	151	7,923
S24A3-SP	0	757	80	126	956	353	159	7,843

Tab. 4.7. Composition des bétons superplastifiés, en Kg/m³

4.7.6 Bétons autoplaçants

La faisabilité de bétons autoplaçants à partir du sable le plus riche en fines et le plus fluide S24A3 a été testée en faisant varier le dosage en superplastifiant. Le mélange obtenu précédemment avec 2/3 de la dose de saturation est référencié S24A3-SP1. Des nouvelles simulations du béton à l'aide du logiciel BétonlabPro2 ont été obtenues pour trois autres dosages de SP/SP_{saturation} égaux respectivement à 1, 1,33 et 1,66 fois la dose de saturation. En total, 15 éprouvettes (16×32 cm) ont été réalisées. Ces bétons sont notés S24A3-SPi.

Leurs compositions sont présentées dans le Tab. 4.8.

	Sable lavé	Sable complet	FC	4/8	10/20	Ciment	Eau Efficace	SP
S24A3-SP1	0	757	80	126	956	353	159	7,843
S24A3-SP2	0	768	81	128	971	354	147	11,978
S24A3-SP3	0	780	82	129	986	353	142	16,007
S24A3-SP4	0	777	82	129	982	348	143	19,772

Tab. 4.8. Composition des bétons autoplaçants riches en fillers à différents dosages en SP

4.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la méthode de formulation théorique choisie pour l'étude, basée sur le logiciel BétonlabPro2.

Les différentes étapes de simulation et de la réalisation des bétons expérimentaux ont été détaillées. Les relations permettant de trouver la composition des mélanges au m³ ont été expliquées, avec les corrections apportées en fonction notamment de l'eau réellement utilisée. Elles permettent de trouver une meilleure estimation des proportions des mélanges réalisés et des propriétés physiques associées

Les mélanges ainsi réalisés vont servir à l'étude de l'influence du taux de fillers sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles des bétons tout calcaire. Ils serviront aussi à tester la pertinence du logiciel BétonlabPro2. Ces deux aspects constituent l'objet du chapitre 5.

Quant à la réalisation des mortiers de bétons équivalents, elle a permis non seulement de trouver une corrélation entre les mesures d'étalement des MBE et des affaissement des bétons réalisés mais aussi de valider la recherche de la dose de saturation en SP par la méthode de sonde et ce en variant le dosage en SP.

Chapitre 5
PROPRIETES DES BETONS CALCAIRES

5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés des différents mélanges réalisés : bétons courants, bétons superplastifiés et bétons conduisant à des BAP. L'étude des propriétés de ces mélanges comportent trois parties.

La première s'intéresse aux propriétés à l'état frais avec les mesures de l'affaissement, du ressuage, de la compacité, de la masse volumique réelle et de l'air piégé.

La deuxième partie concerne les propriétés mécaniques avec les mesures de compression et de traction effectuées à 28 jours.

La troisième partie concerne les propriétés dimensionnelles : retrait endogène, retrait à l'air et expansion dans l'eau. Ces mesures sont confrontées aux prévisions des propriétés prédites par le logiciel BétonLabPro2 ou BTLP2 (présentés dans le chapitre 4) afin notamment de vérifier sa pertinence pour les bétons tout calcaire, y compris ceux riches en fillers.

5.2 Propriétés à l'état frais

Rappelons qu'une série de gâchées de bétons à base des deux gravillons 4/8 et 10/20 et de l'un des sables reconstitués ont été réalisées (comme déjà mentionné au chapitre 4). Ces bétons sont dosés en ciment CEM I à raison de 350 kg/m^3 . Les mélanges superplastifiés ont été obtenus avec un superplastifiant dosé à 2/3 de la dose de saturation du ciment et des fillers calcaires. Les propriétés mesurées à l'état frais des bétons courants, des bétons superplastifiés et des bétons conduisant à des BAP sont données dans les Tab. 5.1, Tab. 5.2 et Tab. 5.3, respectivement.

On observe tout d'abord que les prévisions d'affaissement du logiciel BTLP2 ne sont pas parfaitement vérifiées, puisque des corrections d'eau ont été nécessaires afin d'obtenir les consistances souhaitées :

- pour les bétons courants, de faibles ajouts, n'excédant pas 5 l/m^3 , ont suffi (Tab. 5.1),

- pour les bétons superplastifiés dosés à 2/3 de la saturation (Tab. 5.2), des quantités d'eau inférieures aux quantités prévisionnelles ont finalement été utilisées pour atteindre les maniabilités prévues (rappelons que l'eau a été introduite par étapes successives dans ces mélanges). Le logiciel sous-estime donc l'effet de superplastifiant. Les quantités d'eau finales sont alors inférieures de 10,9 à 48,3 l/m³, selon les mélanges.
- pour les bétons conduisant à des BAP, les corrections apportées sur l'eau dépendent directement de la quantité de superplastifiant utilisée. Pour la dose de saturation (100 % SP), une diminution de 8,1 l/m³ d'eau efficace a été nécessaire. Pour des quantités supérieures de superplastifiant (140 % et 180 % SP), il a fallu ajouter de l'eau pour obtenir les consistances désirées (Tab. 5.3).

Les compositions effectives des bétons résultant des différentes corrections d'eau, réalisées selon les équations présentées dans le chapitre précédent, ont été réintroduites dans BétonlabPro2 afin de simuler les propriétés des différents bétons réalisés. Ces compositions sont indiquées dans les tableaux. On y trouve également d'autres propriétés comme la masse totale de fillers, la compacité Φ et les rapports $A/(A+C)$, G/S et E_{eff}/C de chaque mélange.

Ci-après, les propriétés mesurées à l'état frais sont comparées graphiquement à celles prédites par le logiciel.

Bétons		S0Ai			S6Ai			S12Ai			S18Ai			S24Ai		
Sable		f_3			f_{10}			f_{16}			f_{22}			$f_{D\acute{e}c.}$		
Affaissement A (cm)	A visé	7	15	23	7	15	23	7	15	23	7	15	23	7	15	23
	A obtenu	4	6	14,5	2,6	12,2	18,9	6,1	14,9	16	6,6	8,8	19	7	8,6	15,1
	Correction eau (l/m ³)	+2,5	+4,2	+5	+2,5	+0,8	+2,5	+2,5	0	+3,8	0	+2,7	+1,3	0	+2,8	+5
	A obtenu	8	12,5	20	7	13,6	21,3	7,6	14,9	21,4	6,6	13,1	20,4	7	13	20,2
	A selon BTLP2	9,2	16,9	24	9,4	15,2	23,9	8,7	15	23,6	6,9	16	23,2	7,2	16,2	24
	Ecart	+1,2	+4,4	+4	+2,4	+1,6	+2,6	+1,1	+0,1	+2,2	+0,3	+2,9	+2,8	+0,2	+3,2	+3,8
	Ecart moyen	3,2			2,2			1,1			2			2,4		
Masse volumique MVR (kg/m ³)	MVR (sans air)	2427	2405	2365	2428	2412	2368	2426	2411	2365	2420	2394	2358	2414	2387	2343
	MVR mesurée	2395	2390	2358	2406	2382	2364	2407	2391	2368	2385	2365	2342	2383	2361	2335
	MVR selon BTLP2	2393	2380	2349	2392	2383	2349	2394	2384	2349	2379	2366	2338	2376	2362	2328
	Ecart	-2	-10	-9	-14	+1	-15	-13	-7	-19	-6	+1	-4	-7	+1	-7
	Ecart moyen	7			10			13			3,4			5		
Air (litres)	Air mesuré/calculé	13,5	6,2	3	9,1	12,6	3,1	8,1	8,5	3,1	15	12,3	7,2	12,9	10,9	3,7
	Air selon BTLP2	16	12	9	16	13	9	15	12	8	18	13	10	16	12	9
	Ecart	+2,5	+5,8	+6	+6,9	+0,4	+5,9	+6,9	+3,5	+4,9	+3	+0,7	+2,8	+3,1	+1,1	+5,3
	Ecart moyen	+4,7			+4,4			+5,1			+2,2			+3,2		
Autres propriétés	Masse totale de fillers	33,1	32,9	32,1	77,1	75,8	74	117	115	112	168	166	161	210	207	201
	A/(A+C)	0,09			0,17			0,25			0,32			0,37		
	Compacité du béton Φ	802	796	776	806	793	776	806	796	775	795	784	766	793	781	762
	G/S	1,27			1,27			1,38			1,20			1,29		
	Eeff/C	0,53	0,56	0,63	0,52	0,55	0,63	0,53	0,56	0,63	0,54	0,58	0,65	0,55	0,59	0,67
Indices de serrage	K	6,364	5,866	5,121	6,176	5,842	5,010	6,131	5,775	4,990	5,946	5,47	4,837	5,829	5,364	4,664
	Kf	1,651	1,513	1,312	1,916	1,782	1,506	2,146	1,992	1,675	2,435	2,185	1,886	2,628	2,357	1,986
	Ks	2,852	2,601	2,23	2,507	2,371	2,005	2,081	1,962	1,692	1,953	1,81	1,605	1,711	1,595	1,404
	Kg	1,861	1,752	1,579	1,753	1,689	1,499	1,904	1,821	1,623	1,558	1,475	1,346	1,490	1,412	1,274

Tab. 5.1 : Propriétés à l'état frais des bétons courants

Bétons		S0Ai-SP1		S6Ai-SP1		S12Ai-SP1		S18Ai-SP1		S24Ai-SP1	
Sable		f_3		f_{10}		f_{16}		f_{22}		$f_{Déc.}$	
Affaissement A (cm)	A visé	15	23	15	23	15	23	15	23	15	23
	Correction eau (l/m ³)	-23,1	-44	-43,1	-28,7	-48,3	-37,5	-18	-15,5	-10,9	-12,7
	A obtenu	16	21	17	21	16	21,4	13,5	23,4	17	22
	A selon BTLP2	2,1	0	0	12	0	3,5	10,1	17	12,5	17
	Ecart	-13,9	-21	-17	-9	-16	-17,9	-3,4	-6,4	-4,5	-5
	Ecart moyen	17,45		13		16,95		4,9		4,75	
Masse volumique MVR (kg/m³)	MVR (sans air)	2532	2570	2585	2530	2599	2553	2519	2496	2502	2490
	MVR mesurée	2479	2456	2523	2481	2515	2476	2500	2460	2480	2457
	MVR selon BTLP2	2448	2464	2475	2450	2490	2461	2444	2435	2441	2434
	Ecart	-31	-8	-48	-31	-25	-15	-56	-25	-39	-23
	Ecart moyen	19,5		39,5		20		40,5		31	
Air (litres)	Air mesuré/calculé	20,9	44,4	23,9	19,3	32,4	30,1	7,6	14,5	8,9	13,4
	Air selon BTLP2	23	25	25	19	23	21	21	17	18	16
	Ecart	+2.1	-19.4	+1.1	-0.3	-9.4	-9.1	+13.4	+2,5	+9.1	+2.6
	Ecart moyen	10.75		0.7		9.25		7.95		5.85	
Autres propriétés	Masse totale de fillers	21,3	21,1	68,3	66,8	110	108	167	163	210	207
	A/(A+C)	0,04		0,15		0,22		0,31		0,36	
	Compacité du béton Φ	840	829	855	837	853	835	847	829	840	828
	G/S	1,27		1,27		1,38		1,20		1,29	
	Eeff/C	0,39	0,36	0,33	0,40	0,32	0,38	0,41	0,44	0,43	0,45
Indices de serrage	K	8,213	9,069	8,916	7,455	9,173	7,832	7,011	6,524	6,697	6,379
	Kf	1,838	2,038	2,574	2,025	3,110	2,481	2,640	2,377	2,778	2,592
	Ks	4,052	4,554	3,973	3,305	3,45	2,982	2,491	2,343	2,131	2,05
	Kg	2,323	2,477	2,369	2,125	2,613	2,369	1,880	1,804	1,788	1,737

Tab. 5.2 : Propriétés à l'état frais des bétons superplastifiés

Bétons		S24A3-SPi			
Sable		$f_{Déc.}$			
SPi		SP1	SP2	SP3	SP4
Affaissement A (cm)	A visé	23			
	Correction eau (l/m ³)	-12,7	- 8,1	+ 2,8	+ 17,1
	A obtenu	22	22	23,5	24,35
	A selon BTLP2	17	20,9	24,3	28,7
	Ecart	-5	-1,1	+0,8	+4,35
Ecart moyen		2.8			
Etalement (cm)		-	-	67	73
Temps d'écoulement (s)		-	-	-	2,1
Masse volumique MVR (kg/m ³)	MVR (sans air)	2490	2506,6	2507	2492
	MVR mesurée	2457	2475	2492	2470
	MVR selon BTLP2	2434	2451	2453	2454
	Ecart	-23	-24	-39	-16
	Ecart moyen	25.5			
Air (litres)	Air mesuré/calculé	13,4	12,7	6,1	8,9
	Air prédit par BTLP2	16	16	16	16
	Ecart	+2.6	+3.3	+9.9	+7,1
	Ecart moyen	5.7			
Autres propriétés	Masse totale de fillers	207	210	213	212
	A/(A+C)	0,363	0,366	0,370	0,372
	Compacité du béton Φ	828	840	852	848
	G/S	1,29			
	Eeff/C	0,45	0,42	0,40	0,41
Indices de serrage	K	6,379	6,782	7,011	6,966
	Kf	2,592	2,780	2,908	2,857
	Ks	2,05	2,18	2,242	2,245
	Kg	1,737	1,822	1,861	1,864

Tab. 5.3 : Propriétés à l'état frais des bétons conduisant à des BAP

5.2.1 Affaissement

Pour les bétons courants, on constate que les prévisions d'affaissement données par BétonlabPro2 sont supérieures aux mesures obtenues (Tab. 5.1), mais le différentiel est acceptable puisqu'il n'est que de quelques centimètres en général. A l'analyse, les écarts absolus sont, logiquement, plus faibles pour les bétons fermes (Fig. 5.1). Les prévisions les plus pertinentes sont données pour les bétons S12Ai contenant le sable f_{16} . Les relations proposées pour estimer le seuil de cisaillement τ_0 à partir des indices de serrage partiels (Rel. 4.5 et 4.6), et l'affaissement A qui en découle (Rel. 4.7), apparaissent donc pertinentes pour les bétons calcaires non superplastifiés, y compris les plus riches en fines. Rappelons que ces relations ont été calibrées principalement sur une gamme de bétons siliceux ayant des squelettes généralement pauvres en fines, diversement dosés en ciment [de Larrard, 2000].

Pour les bétons superplastifiés, les écarts entre affaissements prédits par le logiciel pour les mélanges effectivement réalisés et ceux mesurés expérimentalement présentent une plus grande variabilité que précédemment. Les affaissements prédits sont toujours inférieurs à ceux mesurés. Pour les bétons les plus faiblement dosés en fines (S0Ai-SP1, S6Ai-SP1 et S12Ai-SP1), les écarts sont très élevés (Tab .5.2). En effet, le logiciel prévoit un affaissement nul ou très faible, alors que les affaissements sont de l'ordre de 15 et 23 cm respectivement. Cependant, lorsque que la quantité de fillers augmente (S18Ai-SP1 et S24Ai-SP1), les écarts s'amenuisent. Notons que les quantités d'eau utilisées se rapprochent aussi de celles prévues. L'action du superplastifiant vis-à-vis du ciment et des fillers calcaires plus particulièrement ne semble donc pas encore bien prise en compte par les algorithmes du logiciel.

Si l'on se réfère à l'équation de prédiction du seuil de cisaillement (Rel. 4.5) rappelée ci-après, qui contrôle l'affaissement (Rel. 4.7), et dont les fondements physiques paraissent pertinents (résultat macroscopique de la friction entre les grains) :

$$\tau_0 = \exp \left[2,537 + \sum_{\text{granulats}} a_i K_i + [0.224 + 0.910(1 - Sp/Sp^*)^3] K'c \right] = f \left(\sum_{i=1}^n a_i K'_i \right) \quad (\text{Rel. 5.1})$$

il s'agirait alors :

- soit de reconsidérer l'ajustement des paramètres a_i affectant chaque tranche granulaire d_i (Rel. 4.6) caractérisée par son indice de serrage partiel K_i ,
- soit les paramètres et/ou la forme de la fonction concernant la présence du superplastifiant, qui affecte plus spécifiquement l'indice de serrage partiel des fines (ici $K'c$ ou K_f dans les tableaux)
- soit les deux.

Plusieurs ajustements ont été tentés, en associant les mesures initiales ayant servi à l'ajustement du modèle [de Larrard, 2000]. Pour nos propres données, le seuil de cisaillement a été déduit de la relation 4.6 (à défaut de disposer du rhéomètre BTRHEOM). Les résultats obtenus (non présentés), intégrant les trois types de béton (courants, superplastifiés, BAP), ne sont cependant pas assez probants pour pouvoir justifier un nouveau modèle plus généralisé, en raison notamment de l'absence de mesures sur des bétons ayant différents dosages en ciment, et du recours qu'à un seul type de superplastifiant. Toutefois, à ce stade, les indices de serrages partiels K_i , calculés à partir de la Rel. 4.3, sont communiqués dans les tableaux 5.1 à

5.3, pour chaque mélange, à toutes fins utiles... Rappelons que K désigne l'indice de serrage du mélange complet, et Kf, Ks et Kg les indices de serrage partiels des fines (dont le ciment), du sable et du gravillon, respectivement. Chaque indice partiel décrit le niveau de serrage de la tranche granulaire considérée dans le mélange complet.

D'après ces tableaux, on remarque que pour chaque mélange, l'indice global K diminue en fonction de l'ajout de fillers et (logiquement) de la fluidité du mélange. L'indice partiel des fines Kf augmente avec l'ajout de fillers. Les indices partiels Kf et Kg diminuent avec la fluidité du mélange. Ce dernier augmente avec l'ajout de fillers

Avec l'ajout de superplastifiant, on remarque que l'indice global K et l'indice partiel Kf augmentent jusqu'à atteindre un optimum puis ils diminuent ensuite. Quant à celui du gravillon Kg, il croît avec l'ajout de superplastifiant.

Pour les bétons conduisant à des BAP, l'affaissement prédit par le logiciel est inférieur à celui mesuré pour la dose de saturation (100 % SP). Lorsqu'un plus fort dosage en SP est utilisé (140 % et 180 % SP), les affaissements prédits sont supérieurs à ceux mesurés et des ajouts d'eau aux mélanges ont été nécessaires. Les écarts enregistrés entre mesure et prévision, pour les mélanges superplastifiés et fluides, sont compris entre 0,8 et 5 cm (Fig. 5.2). L'écart le plus faible est obtenu pour le mélange S24A3-SP3.

Il semble donc aussi que la prévision par BétonlabPro2 des affaissements pour ce type de bétons ne soit pas fiable, ce qui peut se concevoir aisément compte tenu notamment de leur comportement rhéologique plus singulier associé à leur adjuvantation particulière, et au fait qu'ils présentent un comportement mieux caractérisé par d'autres essais technologiques comme l'étalement par exemple.

Les deux mélanges choisis pouvant conduire à des BAP, à partir du sable de carrière non lavé, contiennent le plus fort taux de fillers (24%) et des dosages élevés en SP (140 et 180 %). Pour ces mélanges, l'essai d'étalement au cône d'Abrams a conduit à des valeurs atteignant 67 cm et 73 cm respectivement, c'est-à-dire comprises dans la fourchette recommandée pour des BAP. Le temps d'écoulement nécessaire à l'obtention d'une galette de diamètre 50 cm a été aussi mesuré. Cette vitesse constitue une observation visuelle qui permet de constater si une ségrégation horizontale a eu lieu ou non. Elle fournit une indication sur le caractère visqueux des BAP. Le temps t_{50} obtenu pour le mélange à 180 % SP est égal à 2,1

secondes (Tab. 5.3), soit une valeur comprise dans l'intervalle 2 et 5 secondes, indiquant ainsi une grande fluidité [EFNARC, 2002]. En revanche, le temps t_{50} obtenu pour le mélange à 140 % SP dépasse 5 secondes. Ce mélange ne répond donc pas à tous les critères exigés pour un BAP.

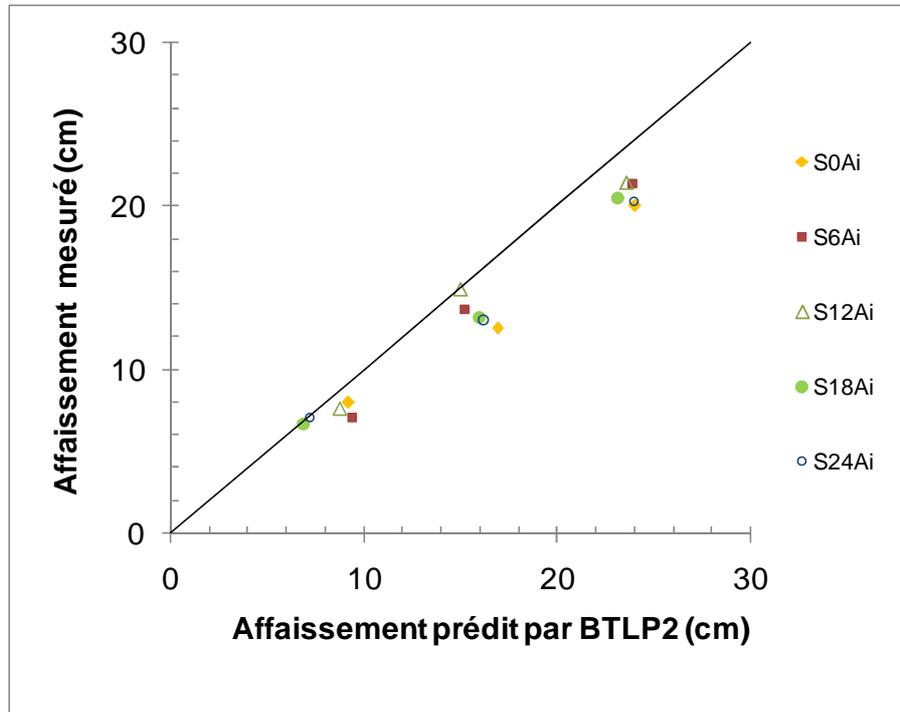


Fig. 5.1 : Comparaison entre affaissement mesuré et affaissement prédit par BTLP2 pour les bétons courants

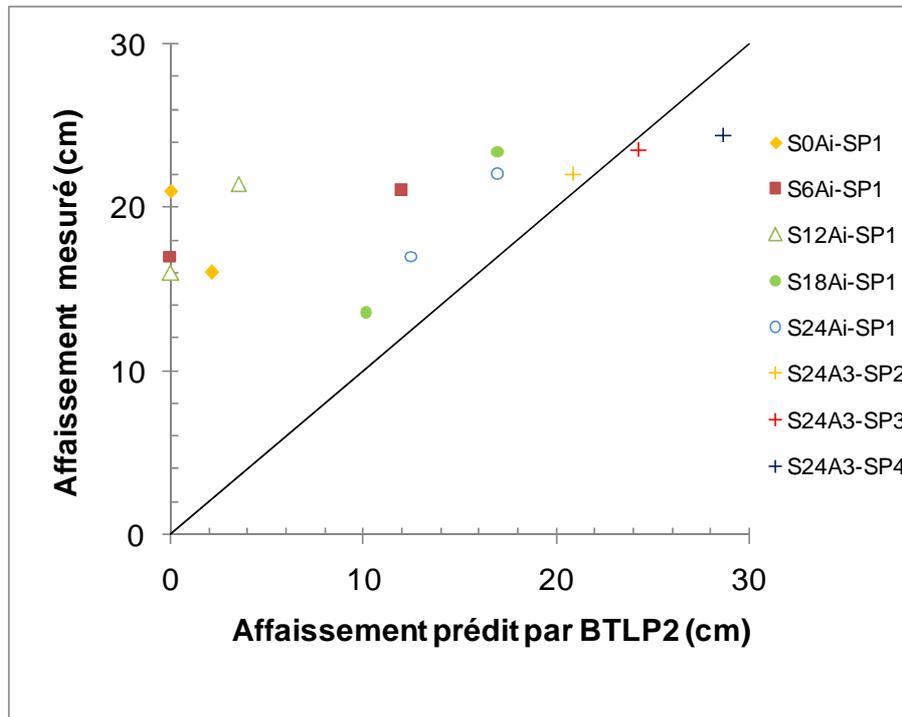


Fig. 5.2 : Comparaison entre affaissement mesuré et affaissement prédit par BTLP2 pour les bétons superplastifiés et les BAP

5.2.2 Air occlus

Les prévisions de la quantité d'air occlus données par BTLP2 sont légèrement supérieures à celles mesurées pour tous les bétons courants (Tab. 5.1), l'écart maximum n'excédant pas 7 l/m^3 , ce qui peut être considéré comme très satisfaisant. Pour les bétons superplastifiés, les écarts sont généralement supérieures (Tab. 5.2 et Tab. 5.3). Là encore, on constate la difficulté de réaliser des prévisions pertinentes en présence de superplastifiant (voir Rel. 4.8 où interviennent l'affaissement et la quantité de superplastifiant), compte tenu notamment de la variété de ces produits et de leur efficacité.

La Fig. 5.3 compare la quantité d'air occlus mesurée expérimentalement et celle prédite par BTLP2.

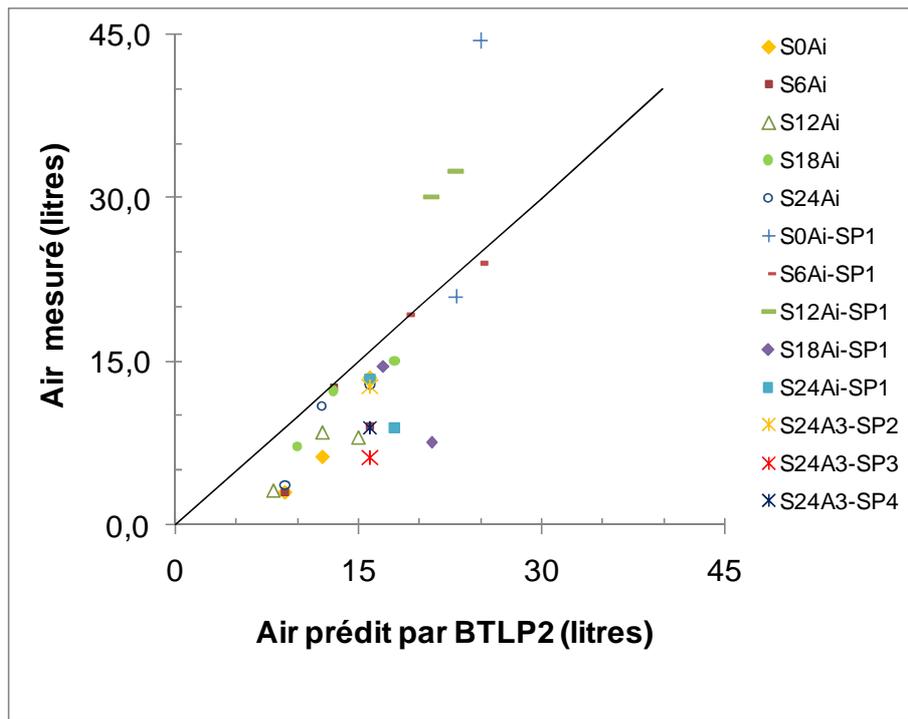


Fig. 5.3 : Comparaison entre air mesuré et air prédit par BTLP2

5.2.3 Ressuage

Le phénomène de ressuage a été observé uniquement pour les bétons sans superplastifiant. On constate que la quantité de fillers influe sur le ressuage, comme l'indique la Fig. 5.4 qui présente l'évolution de l'eau apparue à la surface des éprouvettes après une heure, en litres/m³. En pratique, la quantité de ciment influe aussi sur le ressuage, mais elle est restée constante ici. Lorsque la quantité de fillers augmente, le ressuage diminue, pour les trois consistances. On retrouve ici l'intérêt de la présence des particules fines (ciment, fillers calcaires) pour stabiliser la suspension, comme dans les bétons autoplaçants.

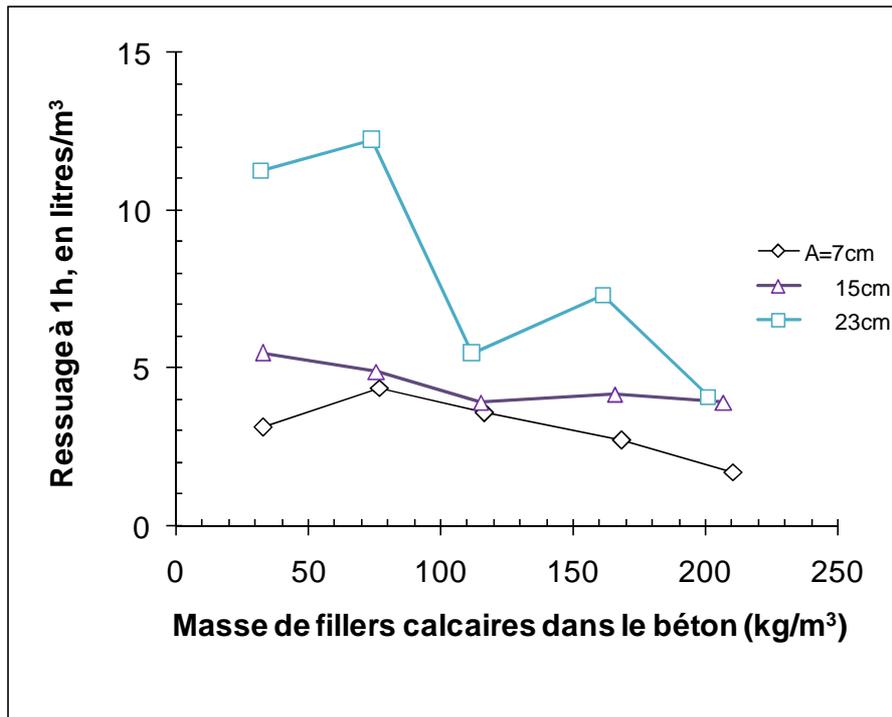


Fig. 5.4 : Ressuage à 1h des bétons courants

5.2.4 Compacité

L'évolution de la compacité Φ des différents bétons en fonction de la quantité de fillers qu'ils contiennent est donnée sur la Fig. 5.5. On constate que la compacité des mélanges à iso-consistance est directement contrôlée par la quantité des fillers, indépendamment des autres paramètres. Pour les bétons courants, la compacité est maximale, pour les trois consistances (Fig. 5.6), pour un apport de 100 à 120 kg de fillers par m³. Pour les bétons superplastifiés, la compacité, bien supérieure, passe aussi par un maximum pour les deux consistances étudiées, mais pour une quantité de fillers calcaires inférieure, comprise entre 60 et 80 kg par m³.

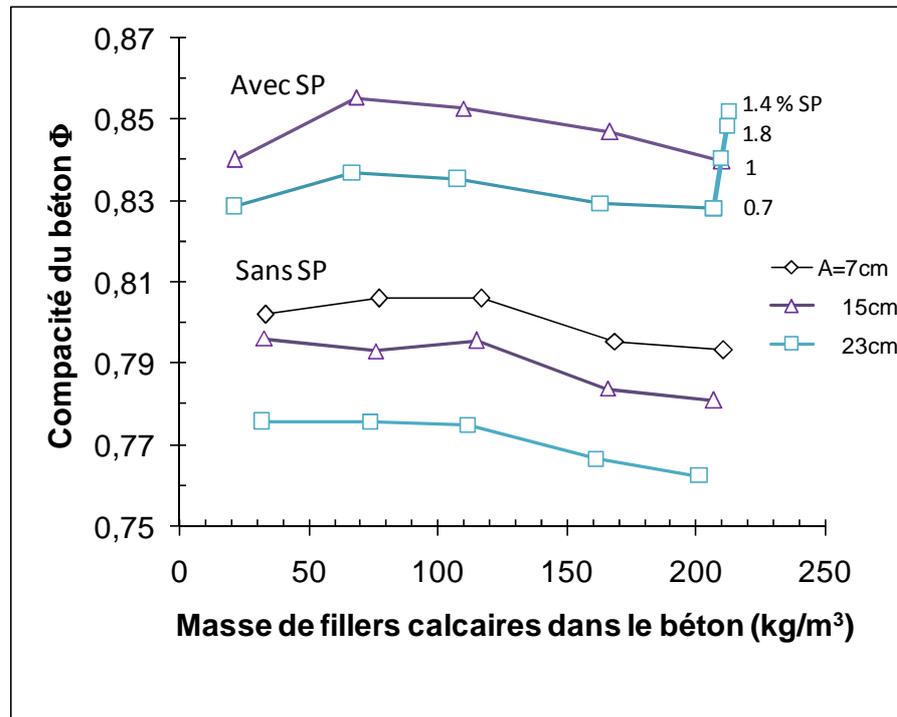


Fig. 5.5 : Compacité des différents bétons en fonction de la quantité de fillers calcaires

On peut alors prétendre qu'un sous-dosage en fillers ne permet pas un comblement optimum des vides intergranulaires. A l'inverse, des quantités élevées de fillers décompactent la suspension par l'excès de grains de mêmes classes de tailles (fillers, ciment), ce qui engendre une plus forte demande en eau, en raison de la plus forte porosité de l'empilement/suspension, comme le montre la Fig. 5.6 où est comparée l'évolution du rapport E_{eff}/C_{eq} en fonction de la quantité de fillers.

La demande en eau des bétons diminue logiquement avec l'ajout de SP. Pour les mélanges contenant la quantité de fillers calcaires la plus élevée, mélanges conduisant à des BAP, on observe cependant une légère diminution de la compacité lorsque le dosage en SP devient conséquent.

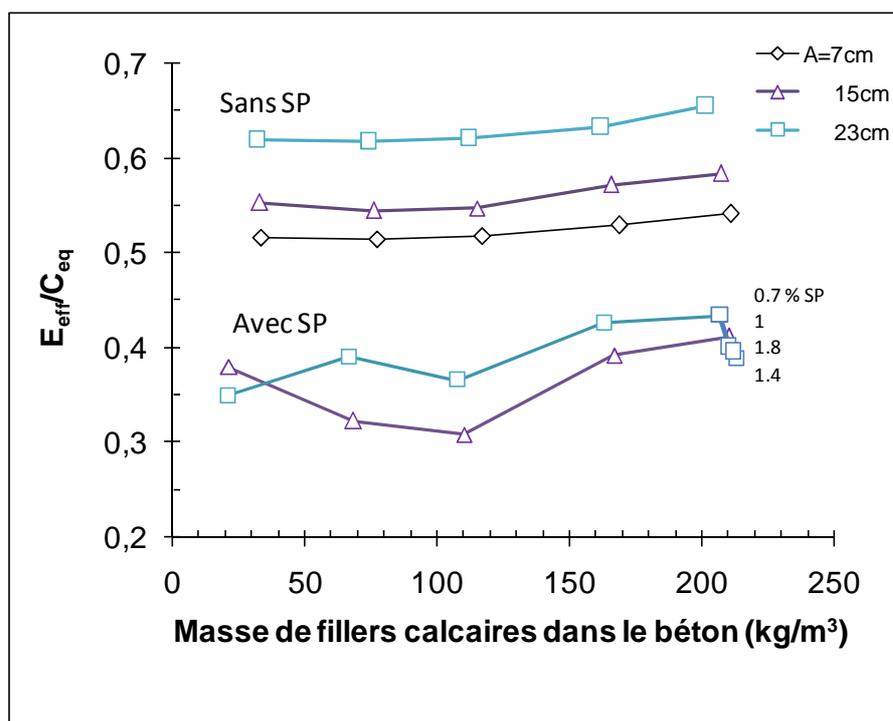


Fig. 5.6 : Évolution du rapport E_{eff}/C_{eq} avec la quantité de fillers.

5.2.5 Masse volumique réelle

L'évolution de la masse volumique réelle, à l'état frais, en fonction du pourcentage de fillers dans le sable ou de la masse de fillers dans le béton, est représentée Fig. 5.7 et 5.8 respectivement. Elle est physiquement corrélée aux propriétés précédentes et elle atteint donc aussi un optimum. Pour les bétons courants, cet optimum correspond aux mélanges réalisés avec le sable à 12 % (correspondant à une quantité de fillers calcaires comprise entre 100 à 120 kg) de fines et pour les trois affaissements considérés. Pour les bétons superplastifiés, il est obtenu avec le sable à 6 % de fines (correspondant à une quantité de fillers calcaires comprise entre 60 à 80 kg) et pour les deux affaissements étudiés.

On notera que la masse volumique des bétons fluides ($A=15\text{cm}$) superplastifiés atteignent des valeurs conséquentes, de l'ordre de 2500 kg/m^3 , en particulier le mélange contenant le sable à 6% de fines.

Pour les bétons courants, les écarts entre masse volumique mesurée et masse volumique prédite par BTL2 restent très faibles, ce qui indique aussi l'excellente pertinence du logiciel pour cette propriété des bétons frais. Pour les bétons superplastifiés, les écarts

enregistrés sont plus élevés, confirmation de la difficulté de la prise en compte de l'action de ces produits.

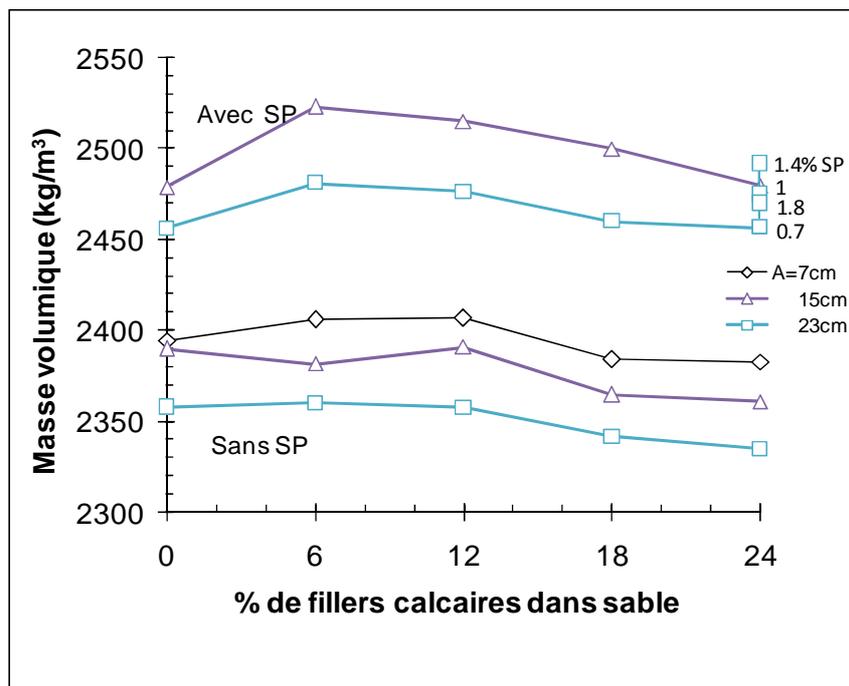


Fig. 5.7 : Variation de la masse volumique réelle en fonction du pourcentage de fillers calcaires dans le sable

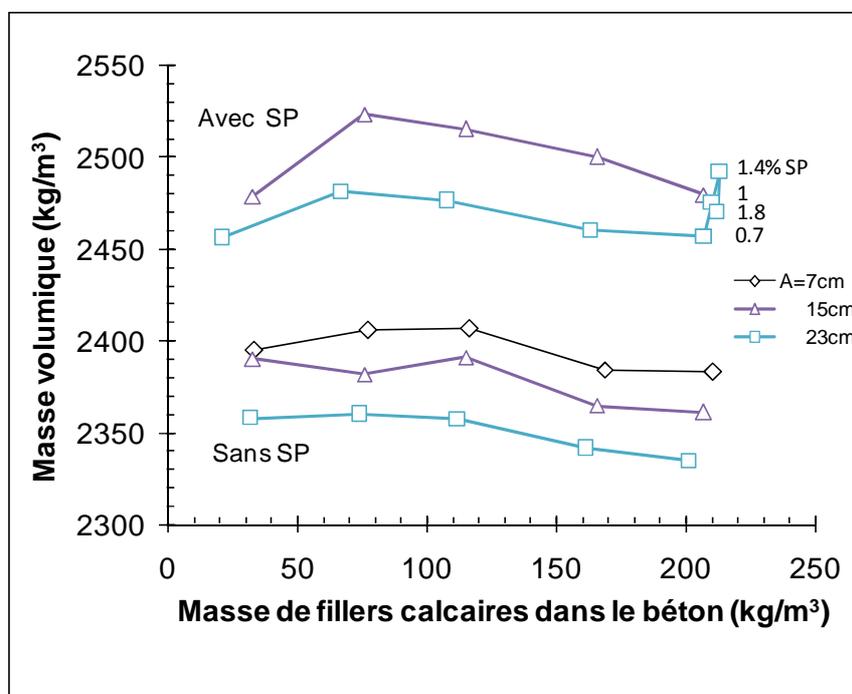


Fig. 5.8 : Variation de la masse volumique réelle des bétons en fonction de la quantité de fillers calcaires

5.3 Propriétés à l'état durci

Les propriétés mécaniques des différents mélanges sont récapitulées dans le Tab. 5.4 pour les bétons courants, le Tab. 5.5 pour les bétons superplastifiés et le Tab. 5.6 pour les bétons conduisant à des BAP.

	Sable	f_3			f_{10}			f_{16}			f_{22}			$f_{Déc.}$		
Paramètres de calcul de la résistance à la compression	D_{max}	16														
	g	0,681	0,675	0,655	0,668	0,656	0,639	0,653	0,644	0,624	0,624	0,613	0,597	0,606	0,595	0,579
	g*	0,805	0,805	0,805	0,812	0,812	0,812	0,815	0,815	0,815	0,814	0,814	0,814	0,815	0,815	0,815
	EMP (mm)	0,92	0,97	1,14	1,08	1,18	1,33	1,22	1,31	1,49	1,48	1,58	1,74	1,66	1,77	1,94
	C_{eq} (kg/m ³)	357	358	357	359	357	358	359	358	358	358	357	358	358	357	357
	f_{c_m} (Mpa)	40,6	38,3	31,4	42	36,6	31,3	41,7	37,6	30,9	37,3	33,3	28,7	36,5	32,5	27,8
	fi/g	0,018			0,043			0,066			0,099			0,128		
	$p^* - q - kt$	1,137 - 0,002 - 0,36														
Résistance à la compression	R_{c28} mesurée (MPa)	38,6	36,2	21,3 ^a	48,3	40,1	33,1	44,7	42,2	34,5	43	40,8	33,5	43,8	39,8	29,8
	R_{c28} Modèle (MPa)	43,9	41,6	34,5	45,4	39,9	34,5	45	40,9	34	40,6	36,6	31,8	39,8	35,7	30,8
	Ecart absolu	5,3	5,4	-	2,9	0,2	1,4	0,3	1,3	0,5	2,4	4,2	1,7	4	4,2	1
	Ecart moyen	5,4			2											
	R_{c28} Modèle complémentaire (MPa)	42,8	40,5	33,6	44,8	39,4	34	45,4	41,3	34,4	43	38,7	33,7	44,4	39,8	34,3
	Ecart absolu	4,2	4,4	-	3,5	0,7	1	0,7	1	0,1	0	2,1	0,2	0,6	0	4,5
	Ecart moyen	4,3			1,2											
Résistance à la traction par fendage	R_{t28} mesurée (MPa)	4,3	3,2	2,8	3,7	2,7	2,3	3,2	3,2	2,7	2,8	3	2,2	2,9	2,9	2,5
	R_{t28} Modèle (MPa)	3,1	2,9	2,6	3,2	3,1	2,7	3,3	3,2	2,8	3,3	3,1	2,8	3,3	3,2	2,8
	Ecart absolu	1,2	0,3	0,2	0,5	0,4	0,4	0,1	0	0,1	0,5	0,1	0,6	0,4	0,3	0,3
	Ecart moyen	0,35														
	R_{t28} Modèle complémentaire (MPa)	2,9	2,7	1,6	3,5	3	2,5	3,3	3,1	2,6	3,2	3	2,5	3,2	3	2,3
	Ecart absolu	1,4	0,5	1,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0	0,1	0,4	0	0,3	0,3	0	0,3
	Ecart moyen	0,3														
Retrait (10 ⁻⁶)	Retrait mesuré à 365 j		387			443			392			347			360	
	Retrait total prédit (HR 50%)	547	604	735	625	665	819	682	728	902	818	887	1030	903	977	1154
	Retrait total calculé (HR 70%)	328	362	441	375	399	491	409	437	541	491	532	618	542	586	692

Tab. 5.4 : Propriétés des bétons courants à l'état durcis

	Sable	f_3		f_{10}		f_{16}		f_{22}		$f_{Déc.}$		
Paramètres de calcul de la résistance à la compression	D_{max}	16										
	g	0,720	0,710	0,716	0,699	0,698	0,683	0,671	0,657	0,649	0,639	
	g*	0,805	0,805	0,812	0,812	0,815	0,815	0,814	0,814	0,815	0,815	
	EMP (mm)	0,61	0,69	0,69	0,82	0,85	0,97	1,06	1,19	1,26	1,35	
	C_{eq} (kg/m ³)	367	365	375	370	373	369	372	367	368	366	
	$f_{c_{m28}}$ (Mpa)	64,6	55,9	77,7	61,3	73,4	59,1	67,2	54,4	60,7	53	
	fi/g	0,011		0,035		0,058		0,091		0,119		
	$p^* - q - kt$	1,137 - 0,002 - 0,36										
Résistance à la compression (MPa)	$R_{c_{28}}$ mesurée (MPa)	62,9	54,1	83,2	64	78,9	59	72,8	61,9	68,7	60,6	
	$R_{c_{28}}$ Modèle (MPa)	66,9	58,9	78,7	63,8	74,9	61,9	69,3	57,4	63,3	56,1	
	Ecart absolu	4	4,8	4,5	0,2	4	2,9	3,4	4,5	5,4	4,5	
	Ecart moyen	4,4		3,7								
	$R_{c_{28}}$ Modèle complémentaire (MPa)	65,1	57,3	77,3	62,7	75	61,9	72,4	60	69,4	61,5	
	Ecart absolu	2,2	3,2	5,9	1,3	3,9	2,9	0,3	1,9	0,7	0,9	
	Ecart moyen	2,7		2,2								
Résistance à la traction par fendage	$R_{t_{28}}$ mesurée (MPa)	4,4	3,2	4,8	4,6	5,8	5,8	4,4	4,5	5,6	5,7	
	$R_{t_{28}}$ Modèle (MPa)	4,1	4,2	4,7	4,1	4,9	4,4	4,4	4,1	4,4	4,2	
	Ecart absolu	0,3	1	0,1	0,5	0,9	1,4	0	0,4	1,2	1,5	
	Ecart moyen	0,74										
	$R_{t_{28}}$ Modèle complémentaire (MPa)	4,5	3,9	5,8	4,6	5,5	4,3	5,1	4,4	4,9	4,4	
	Ecart absolu	0,1	0,8	1	0	0,3	1,6	0,8	0	0,7	1,3	
	Ecart moyen	0,7										
Retrait (10 ⁻⁶)	Retrait mesuré 365 j (10 ⁻⁶)	315		345		368		361		377		
	Retrait total prédit (HR 50%)	355	328	363	425	379	432	557	601	630	663	
	Retrait total calculé (HR 70%)	213	197	218	255	227	259	334	361	378	398	

Tab. 5.5 : Propriétés des bétons superplastifiés à l'état durci

	Sable	$f_{D\acute{e}c}$			
	SPi	SP1	SP2	SP3	SP4
Paramètres de calcul de la résistance à la compression	Dmax	16			
	g	0,639	0,649	0,659	0,656
	g*	0,815	0,815	0,815	0,815
	EMP (mm)	1,35	1,26	1,18	1,2
	C_{eq} (kg/m ³)	366	367	366	361
	$f_{c_{m28}}$ (Mpa)	53	60,6	68,6	64,5
	fi/g	0,119			
	$p^* - q - kt$	1,137 - 0,002 - 0,36			
Résistance à la compression	$R_{c_{28}}$ mesurée (MPa)	60,6	67	72,6	57,4
	$R_{c_{28}}$ Modèle (MPa)	56,1	63,2	70,6	66,8
	Ecart absolu	4,5	3,9	2	9,4
	Ecart moyen	4,2		-	-
	$R_{c_{28}}$ Modèle complémentaire (MPa)	61,5	69,3	77,4	73,2
	Ecart absolu	0,9	2,2	4,8	15,8
	Ecart moyen	1,6		-	-
Résistance à la traction par fendage	$R_{t_{28}}$ mesurée (MPa)	5,7	5,2	4,8	4,4
	$R_{t_{28}}$ Modèle (MPa)	4,2	4,4	4,5	4,4
	Ecart absolu	1,5	0,8	0,3	0
	Ecart moyen	0,64			
	$R_{t_{28}}$ Modèle complémentaire (MPa)	4,4	4,8	5,1	4,15
	Ecart absolu	1,3	0,4	0,3	0,2
	Ecart moyen	0,6			
Retrait (10 ⁻⁶)	Retrait total prédit (HR 50%)	663	618	608	621

Tab. 5.6 : Propriétés des bétons conduisant aux BAP à l'état durci

5.3.1 Résistance à la compression

Les résistances à la compression ont été mesurées à 28 jours pour tous les bétons, par essai de compression uniaxial centré mené sur éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm, conformément à la norme [NT 21.113].

La machine d'essai (Fig. 5.9), est une presse dédiée aux éprouvettes 16 x 32, répondant aux prescriptions de capacité et de dimension des normes [NF P 18-411] et [NF P 18-412].



Fig. 5.9 : Presse de compression pour éprouvettes 16 x 32 cm.

Avant chaque essai, les extrémités des éprouvettes ont été rectifiées par surfacage au soufre, selon la norme [N FP 18-416, 1994]. A défaut d'une rectification au lapidaire, ce traitement permet de s'assurer d'une bonne planéité des surfaces de contact et de leur orthogonalité à la génératrice principale de l'éprouvette. Pour l'essai, l'éprouvette est centrée sur la presse avec une tolérance inférieure à 1% de son diamètre. Elle est ensuite soumise à une charge croissante, appliquée à vitesse constante induisant une contrainte de 0,5 MPa/s, jusqu'à la rupture. La résistance à la compression f_c , en MPa, est le rapport entre la charge de rupture P exprimée en MN et la section transversale S de l'éprouvette exprimée en m^2 (Rel. 5.2).

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Rel.5.2})$$

Cinq éprouvettes par formules ont été réalisées pour les essais mécaniques. Trois ont été testées en compression, les deux autres au fendage (voir plus loin).

Une première éprouvette a tout d'abord été testée en compression pour connaître le niveau de performance du béton. Les deux autres ont alors servi à la mesure du module d'élasticité (contrainte maximale égale au tiers de la contrainte de rupture) avant d'être ensuite testées à leur tour en compression. Toutefois, suite à un problème d'appareillage, les résultats expérimentaux des modules d'élasticité n'ont pas pu être exploités (donc non présentés ici).

Les valeurs de résistance à la compression obtenues sont la moyenne de trois mesures. Elles sont données dans le Tab. 5.4 pour les bétons courants, le Tab. 5.5 pour les bétons superplastifiés et le Tab. 5.6 pour les bétons conduisant à des BAP.

Pour évaluer la résistance à la compression selon les modèles de BétonlabPro2, la résistance de la matrice ($f_{c_{m28}}$) a tout d'abord été calculée selon la Rel. 4.10, après avoir calculé l'épaisseur maximale de pâte (EMP) selon la Rel. 4.11, la quantité de liant équivalent ($c_{eq.}$) selon la Rel. 4.9 et le paramètre $d(7)$ selon la Rel. 5.2 suivante :

$$d(7) = 0.0522 \left(\frac{R_{c7}}{R_{c28}} - 1 \right) \quad (\text{Rel.5.3})$$

avec R_{c7} et R_{c28} les classes vraies du ciment CEM I 42,5 N mesurées à 7 et 28 jours (voir Tab. 3.15).

Rappelons que le ciment de l'étude contient 1,6% de fillers calcaires qui ont été comptabilisés dans la fraction fine calcaire. Les paramètres de calcul de la résistance à la compression correspondant à chaque béton sont donnés dans les Tab. 5.4, Tab. 5.5 et Tab. 5.6.

Les paramètres d'effet d'adhérence p et d'effet limitant q des granulats ont pu alors être déterminés en comparant la résistance mesurée R_{c28} à la résistance de la matrice $f_{c_{m28}}$ des différents bétons. Dans notre cas, le paramètre d'effet limitant q a été conservé égal à celui déterminé précédemment sur ces granulats avec un autre ciment [Achour, 2007], c'est-à-dire $q=0,002$. Ce paramètre est considéré invariant car il est associé à la nature intrinsèque de la roche. Le paramètre d'effet d'adhérence p a alors été déterminé à partir du lissage des performances mesurées sur chaque mélange. La valeur obtenue par optimisation numérique (minimisation des écarts quadratiques) est égal à 1,17.

Des nouvelles simulations ont été alors effectuées avec les compositions effectives et en attribuant les valeurs de p et q retenues à tous les granulats de l'étude, dans l'onglet des propriétés des matériaux (Fig. 5.10).

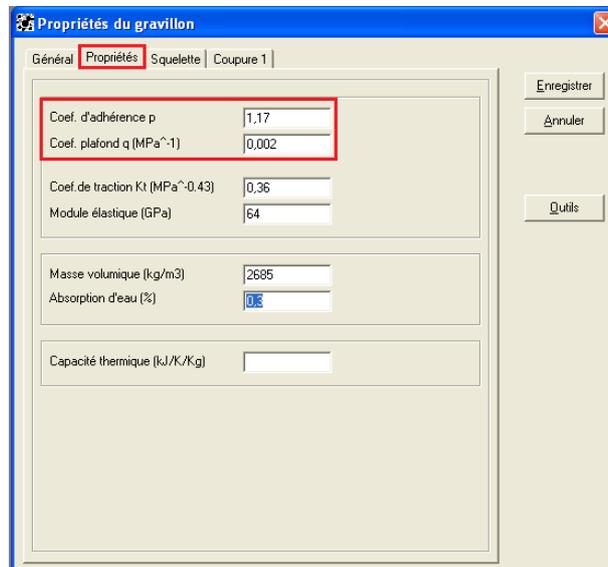


Fig. 5.10 : Prise en compte des valeurs réelles de p et q dans les propriétés des matériaux : Exemple du gravillon 4/8

Les résistances prédites ont été calculées selon les Rel. 4.12 et Rel.5.3. Elles complètent les Tab. 5.4, Tab. 5.5 et Tab. 5.6 où sont aussi données les valeurs du rapport massique fillers/granulats ou f_i/g , et de p et q .

On remarque que les performances prédites par le modèle pour les mélanges les moins fillérisés avec et sans SP (S0Ai et S0Ai-SP) contenant le sable f_3 sont supérieures à celles mesurées. Inversement, les performances prédites sont inférieures aux mesures pour la plupart des autres mélanges, surtout ceux les plus riches en fillers (S24Ai et S24Ai-SP) contenant le sable $f_{Déc}$. On rejoint ainsi les conclusions déjà formulées par Achour *et al.* associant la valeur du paramètre d'adhérence p à la teneur en fillers des granulats [Achour *et al.*, 2008]. La présence des fillers calcaires en quantité rapproche alors le comportement mécanique de la pâte et des granulats, ainsi que leur adhérence respective. Pour les mélanges hydrauliques non superplastifiés à base de granulats calcaires, le paramètre p dépend alors d'un paramètre intrinsèque p^* caractéristique du granulat, et du rapport f_i/g caractérisant l'importance de la phase fine présente, selon la relation :

$$p = p^* \left(1 + 9(f_i/g)^2\right) \quad (\text{Rel.5.4})$$

Le paramètre p^* a été cherché en minimisant l'écart absolu entre résistances mesurées et calculées. Sa valeur est $p^*=1,137$. La courbe correspondante est présentée Fig. 5.11. On notera que les valeurs de p^* et q obtenus désignent une bonne adhérence pâte-granulat et un granulat ayant un faible effet limitant (bonnes propriétés intrinsèques).

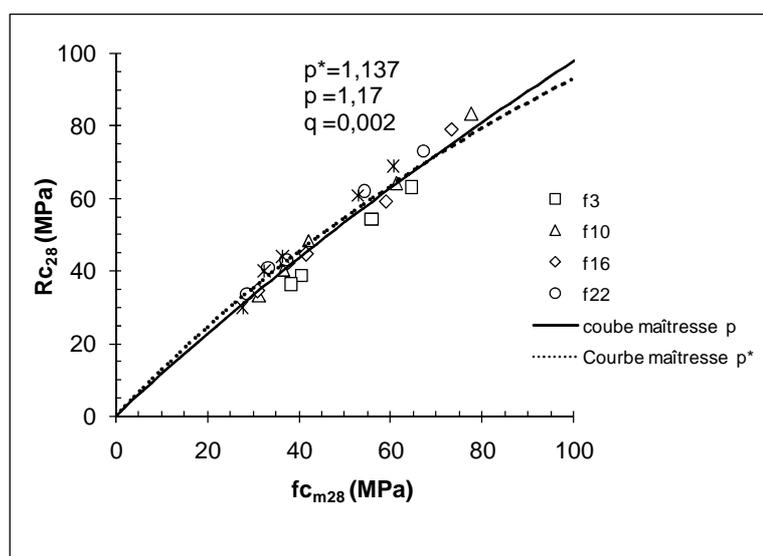


Fig. 5.11 : Relation entre la résistance expérimentale R_{c28} et la résistance de la matrice $f_{c_{m28}}$

Une comparaison entre les prévisions de résistances mécaniques tenant compte soit du paramètre p^* , soit du paramètre p initial et les mesures obtenues montre un écart de 4,3 MPa pour les bétons courants pauvres en fillers (sable f_3) à la place de 5,4 MPa. Cette différence est moindre pour les bétons courants plus riches en fillers, avec un écart absolu de 1,2 MPa seulement à la place de 2 MPa, confirmant ainsi la pertinence de l'outil et de l'extension faite pour les bétons riches en fillers.

Pour les bétons superplastifiés, la comparaison de l'écart moyen entre mesures et prévision du modèle initial et celui entre mesures et prévision du modèle complémentaire passe de 4,4 MPa à 2,7 MPa pour les mélanges pauvres en fillers et de 3,7 MPa à 2,2 MPa pour les autres mélanges.

Rappelons que le concept de paramètre d'adhérence intrinsèque p^* n'a été proposé que pour des bétons calcaires non superplastifiés. **Nos résultats montrent donc qu'il s'applique**

apparemment bien aussi aux bétons calcaires superplastifiés, notamment les plus riches en fillers.

Pour ces mélanges, les résistances prévisionnelles à la compression présentent un écart moyen qui passe de 4.2 MPa pour le modèle initial à 1,6 MPa pour le modèle modifié, ceci pour des ajouts en SP égaux à 2/3 et 1 fois la dose de saturation. Par contre, pour les dosages en SP égaux à 1,4 fois la dose de saturation, le modèle initial se révèle plus précis (écart de 2 MPa au lieu de 4,8 MPa pour). Enfin, pour le plus fort dosage en SP (1,8 fois la dose de saturation), les prévisions des deux modèles sont nettement supérieures aux mesures (plus de 9 MPa d'écart). On rencontre sans doute ici un effet secondaire du superplastifiant lorsqu'il est largement surdosé.

Les résistances expérimentales sont présentées sur la Fig. 5.12 pour chaque affaissement en fonction de la masse de fillers dans le béton (en kg/m³).

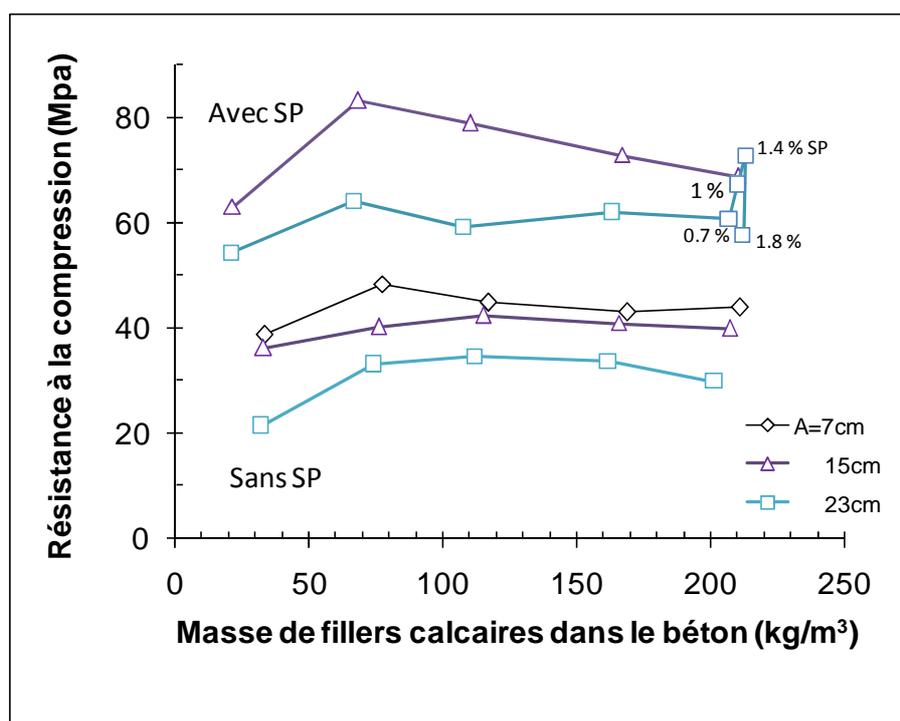


Fig. 5.12 : Résistance à la compression de tous les bétons formulés en fonction de la quantité de fillers

A même affaissement, on constate que les résistances sont maximales pour un apport de 100 à 130 kg/m³ pour les bétons courants et pour un apport de 60 à 90 kg/m³ pour les bétons superplastifiés. Ces quantités conduisent aussi au maximum de compacité pour chaque

type de béton (Fig. 5.5). En deçà de 130 kg/m^3 de fillers, les résistances des bétons courants sont sensiblement plus faibles, notamment pour ceux les plus pauvres en fillers, alors que leur compacité est plutôt forte (Fig. 5.5). Au-delà de cette quantité, les résistances ne diminuent pratiquement pas, bien que la compacité chute. Dans les deux cas, on attribue ce comportement aux relations pâte-granulat et à la rigidité de la phase liante qui évoluent avec la quantité de fillers. L'effet liant des fillers est rapidement atteint avec une faible quantité de produit (sable f_3) et stagne ensuite (voir C_{eq} , Tab. 5.4). Lorsque cette quantité augmente, le comportement mécanique de la pâte se rapproche alors de celui du granulat et le composite devient mécaniquement plus homogène, permettant l'obtention de meilleures performances.

Pour les bétons superplastifiés, les résistances à la compression diminuent lentement au-delà de 130 kg/m^3 de fillers, par contre les compacités diminuent brusquement. Contrairement aux bétons courants, les compacités minimales des bétons superplastifiés sont obtenues pour les mélanges les plus pauvres en fillers (Fig. 5.6). Ce qui explique leurs faibles résistances à la compression par rapport aux autres mélanges.

Les résistances à la compression augmentent lorsque l'ajout de SP passe de 0,7% à 1,4%, ce qui a été déjà constaté pour la compacité. Au-delà de cette valeur, la résistance chute brusquement à cause, probablement, du fort dosage en SP (effet secondaire).

5.3.2 Résistance à la traction

Les résistances à la traction des différents mélanges ont été déterminées par fendage à 28 jours, conformément à la norme [NT 21.115, 1990]. L'éprouvette cylindrique 16×32 à tester est placée horizontalement (essai Brésilien) et au centre de la presse, dans un dispositif de fixation, entre les deux plateaux de la presse (Fig. 5. 13).



Fig. 5.13 : Résistance à la traction par fendage

Le contact des génératrices inférieure et supérieure avec les plateaux est assuré par l'intermédiaire de deux baguettes de contre-plaqué. Un effort de compression, appliqué le long de deux génératrices opposées, induit des contraintes de traction dans le plan diamétral. La résistance à la traction par fendage R_t en MPa est donnée par la Rel. 5.4 suivante :

$$R_t = 20 \times \frac{P}{\pi dh} \quad (\text{Rel. 5.4})$$

où P est la charge maximale en KN, d et h sont respectivement le diamètre et la hauteur de l'éprouvette en cm (soit respectivement 16 et 32 cm).

Les valeurs de résistances obtenues sont données dans le Tab. 5.4 pour les bétons courants et les Tab. 5.5 et Tab. 5.6 pour les bétons superplastifiés. Ces tableaux présentent aussi les résistances à la traction prédites par BetonlabPro2 qui ont été calculées après avoir ajusté le coefficient kt (Rel. 4.15) par optimisations numériques comparatives entre modèle et expérience. La valeur 0,36, caractéristique d'un calcaire semi-dur [de Larrard, 2000], a été obtenue. La comparaison entre mesures et prévisions du modèle donne alors, pour les bétons courants, un écart moyen de 0,35 MPa seulement. Cet écart est doublé pour les bétons superplastifiés (écart moyen de 0,74 MPa pour les bétons superplastifiés et de 0,64 MPa pour les mélanges destinés aux BAP). Ces résultats peuvent être jugés a priori satisfaisants.

Toutefois, les travaux de Achour *et al* [Achour *et al.*, 2008] ont montré que les modèles reliant traction et compression par une loi de puissance, du type de la Rel. 4.15, ne donnent pas de résultats toujours satisfaisants pour les mélanges calcaires. Un modèle

hyperbolique comparable à celui proposé pour le calcul de la résistance à la compression a alors été proposé. Il s'écrit :

$$f_t = \frac{p' f_c}{q' f_c + 1} \quad (\text{Rel. 5.6})$$

avec p' et q' deux coefficients qui dépendent des propriétés mécaniques de la liaison pâte-granulat et du granulat lui-même.

Ce modèle a l'avantage d'associer de façon plus explicite la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat au paramètre p' , et la résistance limite du granulat en traction au paramètre q' [Achour *et al.*, 2008]. Il a donc été appliqué à l'ensemble des mélanges réalisés ici.

Préalablement, d'autres modèles empiriques ont aussi été testés, comme ceux de

- Oluokun [Oluokun, 1991] :

$$f_t = 0.214(f_c)^{0.69} \quad (\text{Rel.5.7})$$

- l'EUROCODE 2 [NF EN 1992-1, 2005] :

$$f_t = \frac{0.3(f_c)^{2/3}}{0.9} \quad (\text{Rel.5.8})$$

- de Larrard (Rel. 4.15).

Les courbes relatives à chacun de ces modèles sont reportées sur une figure (Fig. 5.14) comparant la résistance à la traction à la résistance à la compression.

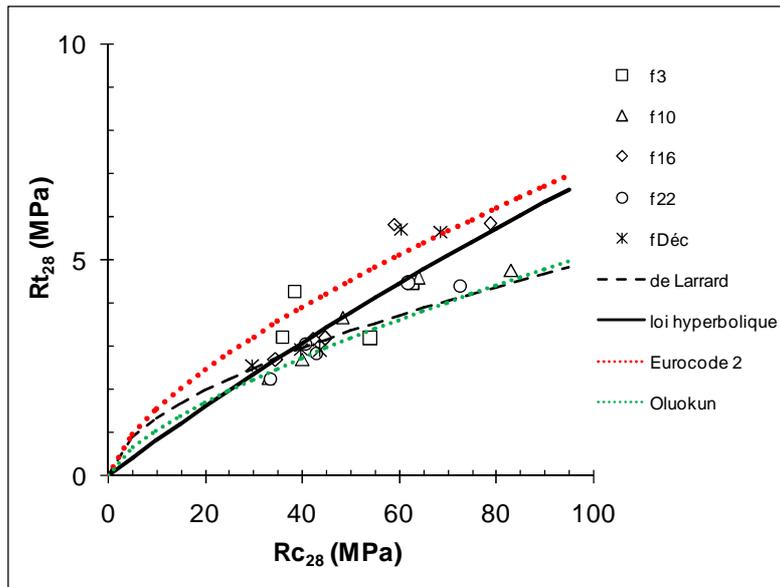


Fig. 5.14 : Comparaison entre la résistance à la traction et la résistance à la compression des différents mélanges. Ajustement de différents modèles empiriques.

On remarque que le modèle de Oluokun sous-estime les fortes résistances de traction, surtout pour les mélanges superplastifiés. En revanche, le modèle de l'EUROCODE 2 surestime presque toutes les résistances expérimentales. Ceci a été déjà observé dans les travaux de Achour *et al.*. L'écart moyen obtenu entre expérience et modèles est de 0,68 MPa pour le modèle de Oluokun et de 0,85 MPa pour le modèle de l'EUROCODE 2.

L'application du modèle de BTLP2, qui considère un coefficient k_t lié à la qualité du granulat (Rel. 4.15), conduit à un écart moyen de 0,62 MPa, valeur plus faible que pour les deux modèles précédents.

Les paramètres p' et q' du modèle hyperbolique ont alors été calibrés à partir des performances mécaniques obtenues pour les différents mélanges. Les valeurs trouvées sont respectivement 0,083 et 0,002. La courbe obtenue est notée loi hyperbolique. L'erreur moyenne entre prévisions et mesures tombe alors à 0,45 MPa.

La résistance à la traction des différents bétons formulés est présentée Fig. 5.15, en fonction de la quantité de fillers.

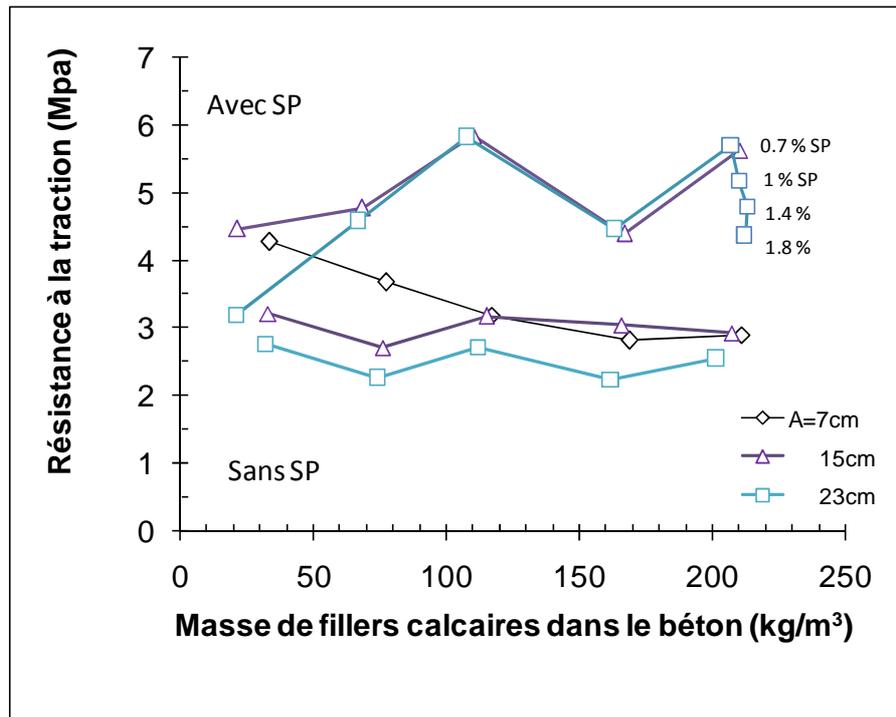


Fig. 5.15 : Résistance à la traction des différents bétons formulés en fonction de la quantité de fillers

Bien que ces résultats soient la moyenne de deux mesures seulement, on constate que les résistances des bétons courants sont sensiblement constantes quelle que soit la quantité de fillers (environ 3 MPa) excepté pour les bétons fermes ($A=7\text{cm}$) riches en fillers, pour lesquels les performances sont inférieures à celles attendues (environ 4 MPa).

Les résistances à la traction des bétons superplastifiés sont nettement supérieures, comprises entre 4,4 MPa et 5,8 MPa, excepté pour le mélange fluide pauvre en fillers (3,2 MPa). Des différences plutôt aléatoires apparaissent selon la quantité de fillers. Le superplastifiant a une action néfaste quand sa quantité augmente. D'une manière générale, on vérifie ici que les fillers calcaires ajoutés en quantité n'altèrent pas significativement la résistance à la traction, comme déjà constaté dans des travaux précédents [Bedday, 2000 ; Achour, 2008].

Les observations expérimentales sur les plans de rupture en fendage (Fig. 5.16) montrent que les granulats ne sont pas rompus mais plutôt déchaussés pour les bétons courants. C'est alors la zone de contact pâte-granat qui est affectée. Pour les bétons superplastifiées, c'est généralement l'inverse.



Fig. 5.16 : Exemple d'un plan de rupture en fendage d'un béton courant

5.4 Mesure des variations dimensionnelles

Les réductions dimensionnelles du béton, en l'absence de chargement, sont dues essentiellement aux évolutions hydriques internes et/ou externes. On distingue :

- le retrait plastique : créé par la dessiccation de la pâte de ciment au début du phénomène d'hydratation, en phase plastique. Le retrait plastique n'est ni plus ni moins que le retrait de séchage qui se déroule lorsque le béton n'a pas encore durci [Parmentier, 2009].
- le retrait thermique dû aux effets des gradients de température qui se manifestent dans le béton lors de la dissipation de la chaleur d'hydratation.
- le retrait endogène du béton, appelé aussi retrait d'auto-dessiccation ou retrait chimique, est une déformation qui résulte du fait que le volume des produits de l'hydratation est plus petit que le volume des réactifs en présence [Aïtcin, 1998]. Cette déformation est présente même sans échange hydrique avec l'environnement. Il s'agit donc d'une dessiccation interne de la pâte de ciment au cours de l'hydratation.
- le retrait de séchage du béton, appelé aussi retrait hydraulique ou retrait de dessiccation, résulte du séchage de la masse du béton [Aïtcin, 1998]. Cette évaporation, qui peut s'étaler sur plusieurs années, crée des tensions à l'interface des grains de ciment hydratés qui génèrent à leur tour des déformations macroscopiques de l'élément, à savoir un raccourcissement.

Les mesures de variations dimensionnelles ont été suivies pendant 1 an sur les cinq bétons d'affaissement intermédiaires (15 cm) coulés dans des éprouvettes réalisées spécifiquement pour l'étude.

5.4.1 Préparation et fabrication des corps d'épreuves

Les variations dimensionnelles des bétons n'ont pas été mesurées sur des éprouvettes habituelles 7×7×28 cm, mais sur des éprouvettes cylindriques spécifiques, d'élançement 9 bien supérieur, afin d'augmenter la sensibilité de l'observation.

Des tubes en PVC de diamètre intérieur 71 mm et de longueur 640 mm ont été alors utilisés afin de couler six éprouvettes pour chaque type de béton. Le choix d'un corps d'épreuve d'élançement élevé a été fait par souci d'allier précision des mesures et faisabilité. Un bâti approprié muni d'un comparateur digital et d'une tige d'étalonnage de 640 mm ont alors été réalisés (Fig. 5.17).



Fig. 5.17 : Bâti de mesures



Fig. 5.18 : Fixation de l'éprouvette au fond

Six fonds métalliques (Fig. 5.19) pour la partie inférieure et six plaques circulaires pour la partie supérieure, troués en leur centre, ont été fabriqués. Des bagues métalliques servant à supporter les éprouvettes ont été aussi fabriquées (Fig. 5.19).



Fig. 5.19 : Fond et support métalliques

Un galon de silicone a servi à assurer l'étanchéité à la base de chaque moule (Fig. 5.18). Enfin, des casiers en bois servant à la conservation des carottes de sols, de l'aluminium adhésif et des plots ont été utilisés. Le schéma des moules est donnée Fig. 5. 20.

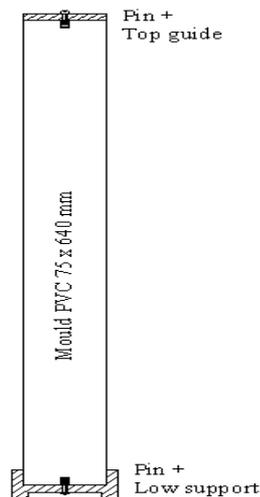


Fig. 5.20 : Schéma des moules

5.4.2 Fabrication et conservation des éprouvettes

Les éprouvettes cylindriques en PVC ont été coulées verticalement. Les moules comportaient à la base un fond métallique supportant en son centre un plot destiné à la mesure des variations dimensionnelles. Ce plot est maintenu par une vis. Le remplissage s'est fait par couches successives d'environ 16 cm, vibrées chacune à l'aiguille vibrante (retirées lentement). Les éprouvettes ont ensuite été fermés par l'autre dispositif constitué d'une plaque

circulaire posée sur le béton, pouvant se déplacer librement en cas de retrait plastique et/ou de ressuage (Fig. 5.21). Cette plaque supportait en son centre un autre plot fixé aussi par une vis.



Fig. 5.21 : Eprouvettes après coulage

Après 24h, ces éprouvettes ont été débarrassées du système de maintien des plots (vis, fond et plaque). Pour deux d'entre-elles, les extrémités ont été fermées avec de l'aluminium adhésif (Fig. 5.22) et conservées dans une chambre à 20°C et 65% HR (Fig. 5.24). Après 28 jours, elles ont été démoulées (découpe du PVC, Fig. 5.23) puis conservées dans la même chambre.



Fig. 5.22 : Fermeture de l'extrémité de l'éprouvette par un film d'aluminium adhésif



Fig. 5.23 : Découpe du PVC après 28 jours

Les quatre autres éprouvettes ont été démoulées à 24h et conservées soit dans l'eau à 20°C (Fig. 5.25), soit dans l'air ambiant à l'extérieur du laboratoire et à l'abri du soleil (Fig. 5.26).



Fig. 5.24 : Conservation des éprouvettes emballées



Fig. 5.25 : Conservation des éprouvettes dans l'eau



Fig. 5.26 : Conservation des éprouvettes à l'air ambiant

5.4.3 Résultats et interprétations

La mesure des variations dimensionnelles et massiques a été effectuée pendant un an. Les mesures ont été faites par pas de temps rapprochés tout d'abord, puis de plus en plus espacées par la suite. Un échéancier a servi au suivi des dates de mesures pour chaque béton. La longueur L_0 de ces éprouvettes a été relevée 24 heures après coulage. La Fig. 5. 27 montre un exemple de mesure des variations dimensionnelles.



Fig. 5.27 : Exemple de mesure des variations dimensionnelles

Les résultats obtenus pour les éprouvettes conservées dans l'air ambiant (retrait) et dans l'eau à 20°C (expansion) sont présentés sur la Fig. 5.28a pour les bétons courants et par la Fig. 5.28b pour les bétons superplastifiés. Elles sont accompagnées de la mesure des variations relatives de masse (Fig. 5.29). Les valeurs présentées sont la moyenne de deux mesures à chaque échéance.

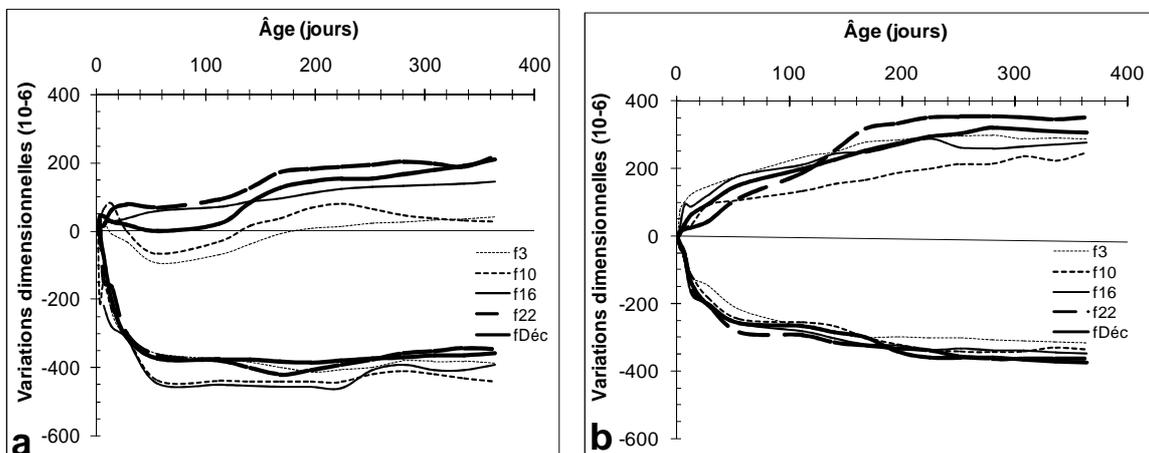


Fig. 5.28 : Variations dimensionnelles : retrait dans l'air et expansion dans l'eau.

(a) bétons courants ; (b) bétons superplastifiés.

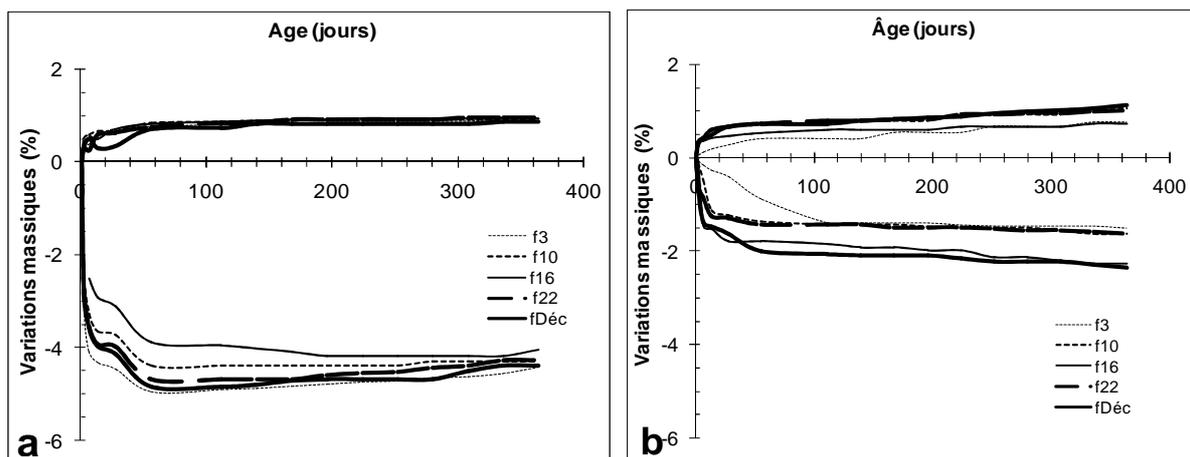


Fig. 5.29 : Variations massiques des bétons dans l'air et dans l'eau.
 (a) bétons courants ; (b) bétons superplastifiés.

Pour le retrait, on constate qu'il n'y a pas de distinctions marquées selon la quantité de fillers. L'essentiel du retrait est atteint après deux mois d'exposition seulement pour les bétons courants, avec une valeur de l'ordre de $400 \cdot 10^{-6}$ qui demeure quasi-constante par la suite (une certaine corrélation avec la compacité peut toutefois être distinguée à long terme).

Pour les bétons superplastifiés, l'évolution du retrait est plus progressive et un retrait équivalent à celui des bétons non superplastifié est atteint après un an d'exposition, quel que soit le sable fillérisé présent dans le béton.

Les pertes de masse des bétons courants sont très rapides et plutôt conséquentes, et semblent reliées à la quantité de fillers et à la compacité, mais elles se rejoignent à long terme. Le retrait n'est donc pas directement synchronisé à la dessiccation.

BétonlabPro2 prévoit un retrait final bien supérieur (Tab.5.4) et dépendant de la quantité de fillers. Ce différentiel est dû vraisemblablement à la différence de contexte : pièces de diamètre 160 mm, humidité relative de 50% et retrait final à très long terme pour BétonlabPro2 [de Larrard, 2000] ; pièces de diamètre 71 mm, humidité relative moyenne de 70%, variant de 56 à 76% pour la région de Tunis (zone semi aride à hiver doux) [Antipolis, 2000, Données météo], retrait à un an.

En effet, le plus faible rayon moyen (rapport section/périmètre) des éprouvettes utilisées accélère la dessiccation à cœur et conduit plus rapidement à l'équilibre hydrique interne. Le retrait est alors accéléré, nivelant à terme les éventuelles différences pouvant

apparaître avec la nature du sable (taux de fillers) et/ou la compacité des bétons. On trouve ici un argument pour expliquer le comportement assez homogène observé, y compris entre béton superplastifiés ou non.

Par contre, les retraits mesurés sont bien plus faible que ceux prédits, en particulier pour les bétons courants moins compacts. La raison est manifestement liée aux conditions hydriques différentes entre les deux séries d'essais, qui conditionnent grandement l'amplitude des retraits finaux des bétons. En effet, comme le montre la relation suivante [de Larrard, 2007] qui permet d'estimer le retrait total d'un béton placé dans un environnement à une humidité relative donnée, connaissant son retrait mesuré ou calculé dans un environnement à une autre humidité - un béton qui présente un retrait de $500 \cdot 10^{-6}$ à 50% d'humidité relative, aura un retrait de $300 \cdot 10^{-6}$ à 70% d'humidité relative [de Larrard, 2007] :

$$\frac{(100 - 70)}{(100 - 50)} \times 500 = 300 \cdot 10^{-6} \quad (\text{Rel. 5.9})$$

Cette relation a alors servi à réévaluer les retraits prédits par BTLP2 pour l'humidité relative moyenne des essais, c'est-à-dire 70% HR. Les valeurs obtenues complètent les Tab. 5.4 et Tab. 5.5. Elles montrent toujours une dépendance à la quantité de fillers dans les bétons, mais le différentiel avec les valeurs mesurées est bien plus fiable, en particulier pour les bétons pauvres en fillers ($\leq 6\%$) sans superplastifiant, et pour les bétons riches en fillers avec superplastifiant. Dans les autres cas, les retraits recalculés sont respectivement plus importants et moins importants que les retraits mesurés.

Pour les éprouvettes conservées dans l'eau, on observe au départ, pour les bétons courants, une stagnation, voire un retrait (Fig. 5.28a). Une certaine distinction apparaît aussi selon la quantité de fillers. L'expansion progresse ensuite lentement et de façon assez homothétique pour les différents bétons. A terme, on peut supposer que les bétons riches en fillers atteindront une expansion supérieure à $200 \cdot 10^{-6}$. Pour les plus pauvres, elle sera moindre vraisemblablement.

Pour les bétons superplastifiés, le comportement initial est différent (pas de retrait) et l'expansion finale est supérieure (de l'ordre de $300 \cdot 10^{-6}$ pour les mélanges riches en fillers et de l'ordre de $200 \cdot 10^{-6}$ pour les mélanges pauvres en fillers, Fig. 5.28b). Toutes les éprouvettes présentent une prise de masse dès l'immersion (Fig. 5.29 a et b), sans réelle distinction selon la quantité de fillers. Ici encore, il n'y a pas réelle synchronisation entre les deux phénomènes.

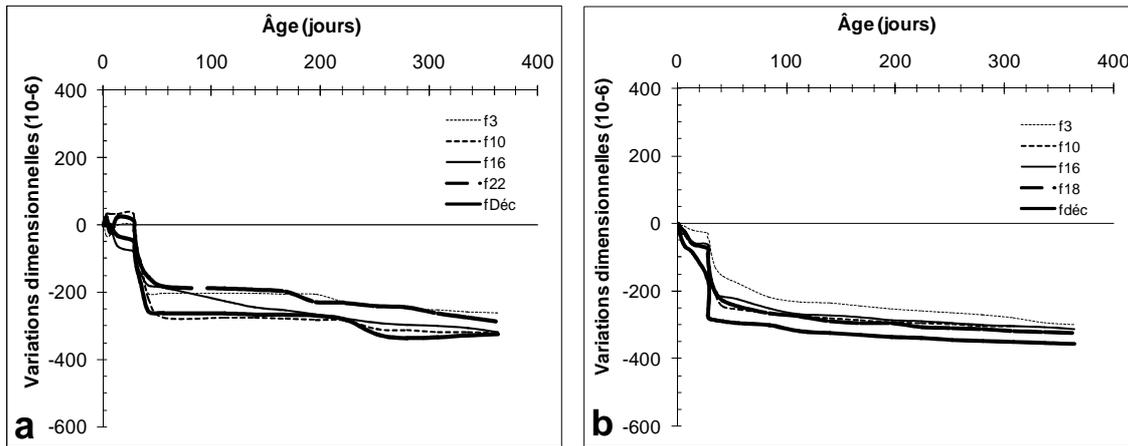


Fig. 5.30. Variations dimensionnelles des bétons protégés pendant 28 jours: retrait endogène et retrait de dessiccation dans l'air à partir de 28 jours. (a) bétons courants. (b) bétons superplastifiés.

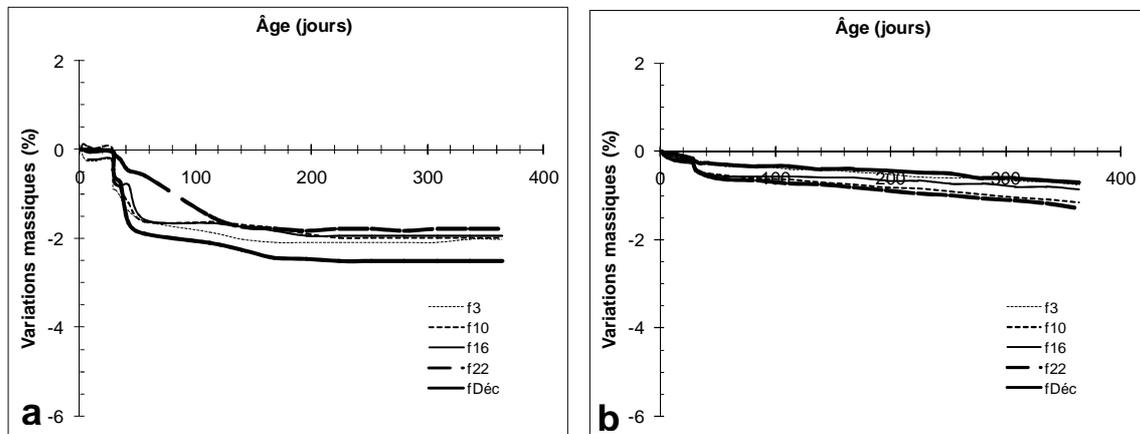


Fig. 5.31 ; Variations massiques des bétons protégés pendant 28 jours puis dans l'air.

(a) bétons courants. (b) bétons superplastifiés.

Pour les éprouvettes protégées initialement de tout échange hydrique pendant 28 jours, (Fig. 5.30 et 5.31), il est difficile de distinguer des différences fiables de retrait endogène durant cette période entre les bétons. Ce retrait ne dépasse pas $50 \cdot 10^{-6}$. Après exposition à l'air, les bétons subissent un retrait rapide durant les 15 premiers jours, alors que la perte de masse est moins rapide. Il est toutefois moitié moindre ($\sim 200 \cdot 10^{-6}$) que pour les bétons exposés directement à l'air à 1 jour. Il progresse ensuite lentement pour rejoindre à long terme celui des éprouvettes exposées à l'air dès le départ. Comme pour ces dernières, il paraît délicat de vouloir distinguer des différences selon la quantité de fillers, en raison des comportements similaires.

5.5 Conclusion

Ce chapitre présente les propriétés obtenues pour les différents bétons formulés afin d'étudier le rôle du taux de fillers contenu dans le sable. Les propriétés mesurées à l'état frais et à l'état durci ont permis de montrer que les fillers amélioraient la plupart des propriétés. La quantité optimale de fillers calcaires conduisant à l'obtention du mélange le plus compact a été déterminée avec et sans superplastifiant. Les propriétés mécaniques ont montré qu'il est possible d'obtenir de bonnes performances pour tous les types de bétons étudiés, même ceux réalisés avec les sables ayant un taux de fines élevé. Les fillers calcaires ajoutés en quantité n'altèrent pas significativement la résistance à la traction.

Quant aux variations dimensionnelles, il n'y a pas de distinctions marquées selon la quantité de fillers pour le retrait, tandis que ce sont les mélanges riches en fillers qui ont présentés plus d'expansion. Le maximum de retrait est obtenu pour les mélanges non superplastifiés.

La formulation des bétons riches en fines à différents dosages en SP a permis de distinguer que certains mélanges ne présentent plus des affaissements mais plutôt des étalements supérieurs à 65 cm, ce qui leur permettent d'appartenir à la gamme de béton autoplaçant. Ces mélanges contribuent alors à la faisabilité des bétons autoplaçants à partir des sables concassés riches en fillers.

Chapitre 6

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

De nombreuses études se sont intéressées à la recherche de voies alternatives à l'utilisation des ressources alluvionnaires en voie d'épuisement, notamment les sables alluvionnaires, pour la fabrication des bétons hydrauliques. Parmi les solutions proposées, l'emploi des sables calcaires de concassage est souvent recommandé. Cependant, dans les pays de Maghreb, en Tunisie notamment, leur utilisation est jusqu'à présent écartée quasi systématiquement de tout usage dans le bâtiment et les ouvrages d'art, malgré les avantages économiques et environnementaux que cette solution peut présenter. Notons que les spécifications normatives autorisent leur utilisation.

Cette situation résulte essentiellement de l'absence de références scientifiques fiables à l'échelle du pays, et d'un manque d'exemples de réalisation d'ouvrages de références pouvant convaincre les maîtres d'ouvrages et les entreprises.

Dans ce contexte, le Laboratoire de Génie Civil de l'Ecole National d'Ingénieurs de Tunis (LGC-ENIT) a soutenu un programme de recherches et des rencontres scientifiques cherchant à solutionner la pénurie des sables alluvionnaires pour la réalisation des bétons, par l'utilisation des sables calcaires de concassage. Quatre thèses de doctorat ont ainsi été préparées. Parallèlement, le Ministère de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement des Territoires (MEHAT) a lancé la réalisation d'un manuel technique dédié à la généralisation de l'emploi des sables calcaires dans les différents domaines de la construction.

Les travaux de cette thèse concourent à ces objectifs. Ils s'intéressent plus particulièrement à la faisabilité de bétons ordinaires ou superplastifiés, fabriqués uniquement et rationnellement à partir de gravillons et de sables de concassage calcaires issus de la carrière de Jbel Ressas à proximité de Tunis. Un seul sable élaboré spécifiquement par le carrier a permis de fabriquer des sables à différents taux de fillers correspondant respectivement aux cinq catégories de la norme EN 12620 (f_3 à $f_{Déc}$). La formulation des différents bétons contenant deux gravillons et alternativement l'un de ces sables a été réalisée avec le logiciel BetonlabPro2, qui permet de prédire de nombreuses propriétés des bétons en se basant sur le Modèle d'Empilement Compressible (MEC). Les résultats obtenus pour les proportions du squelette granulaire ont été confrontés à ceux de la méthode empirique de Dreux. De même, la quantité de superplastifiant nécessaire au ciment et aux fillers calcaires a été déterminée par deux méthodes originales et nouvelles qui ont donné des résultats comparables.

Les mélanges ainsi réalisés ont servi à étudier en vraie grandeur, sur des bétons – et non pas sur des mortiers comme habituellement –, l'influence du taux de fillers des sables sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles des bétons "tout calcaire". Ils ont confirmé la parfaite faisabilité de bétons ordinaires et de bétons superplastifiés « tout calcaire » en Tunisie. Les résultats obtenus montrent que les fillers calcaires apportés par le sable concassé sont bénéfiques à l'amélioration des propriétés à l'état frais et durci des bétons. Par exemple, pour un dosage en ciment CEM I de 350 kg/m^3 , une quantité de fillers de 100 à 130 kg/m^3 pour les bétons courants et de 60 à 80 kg/m^3 pour les bétons superplastifiés, permet d'augmenter la compacité et d'améliorer sensiblement les performances mécaniques des bétons. Au-delà de ces valeurs, le rapport e/c augmente légèrement, induisant ainsi une baisse concomitante de la compacité (effet décompactant), mais les propriétés rhéologiques et mécaniques ne sont pas réellement altérées.

Compte tenu des quantités de sables généralement utilisées dans les bétons courants et les bétons superplastifiés, de rapports gravillon/sable usuels, toutes les catégories normatives des sables de concassage (f_3 à f_{22}) peuvent alors être utilisées a priori, sous réserve toutefois de satisfaire aux autres exigences de qualité/propreté/durabilité 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 serait d'ailleurs préconisée pour obtenir des bétons de type autoplaçants, en apportant tout ou partie de la quantité importante de fillers rencontrée dans ces produits. Ce résultat constitue une voie nouvelle et économique pour le développement de ces nouveaux bétons, en valorisant des sables concassés souvent déclassés.

Par ailleurs, les présents travaux ont montré que les propriétés mécaniques des bétons calcaires avec ou sans superplastifiant ne sont pas réellement affectées par la présence d'une quantité élevée de fillers ($\sim 200 \text{ kg/m}^3$), contrairement aux prévisions de BétonlabPro2. Ce résultat est attribué au rapprochement du comportement mécanique du granulat calcaire et de la pâte chargée en fillers calcaire, qui rend ainsi le composite plus homogène mécaniquement. La liaison pâte-granulat, qui est souvent une zone de faiblesse, est alors améliorée. L'effet néfaste du surcroît d'eau est ainsi compensé. Les algorithmes de BétonlabPro2 ne prennent pas en compte ce comportement. Les présents travaux pourraient alors participer à leur amélioration, sur la base d'un modèle proposé précédemment, reliant l'effet d'adhérence à la quantité relative de fillers dans le mélange. Ce modèle a été confirmé ici pour les bétons courants et étendus pour les bétons superplastifiés.

Les affaissements prédits par BétonlabPro2 s'avère aussi plutôt pertinents, du moins pour les bétons sans superplastifiant, quelque soit le taux de fillers. Le modèle rhéologique du seuil de cisaillement semble donc bien ajusté. En revanche, en présence de superplastifiant, les prévisions sont trop pessimistes, en raison vraisemblablement de la difficulté de la prise en compte, dans le calibrage des algorithmes, de l'efficacité réelle de ces produits, dont la variété et l'efficacité ne cessent d'évoluer continuellement.

Enfin, il est couramment admis que les fillers favorisent le retrait total des bétons. Ces travaux ont montré cependant qu'il n'existait pas de distinctions réellement marquées selon la quantité de fillers, dans les différentes conditions d'environnement testées. Nos mesures réalisées sur bétons contredisent alors dans une certaine mesure celles couramment faites sur mortiers. Il peut s'agir d'un effet d'échelle, souvent négligé, entre ces deux types de composite. Nos travaux sur bétons trouvent donc ici aussi un intérêt.

Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives. La plus importante concerne sans doute l'élaboration des matériaux concassés. Il s'agirait de proposer, pour une carrière calcaire donnée et en fonction des propriétés de la ressource, une stratégie d'exploitation et de concassage conduisant à la valorisation optimale du gisement, avec, non pas comme actuellement, la seule production de gravillons au détriment des sables écartés ou dévalorisés. L'élaboration de coupures adaptées, dont celles de sable fillérisés, permettrait, selon les cas, la fabrication de bétons ordinaires, de bétons superplastifiés et de bétons autoplaçants de qualité, tout calcaire, sans production excessive de déchets. Cette voie s'inscrit pleinement dans le concept développement durable et de protection de l'environnement, car elle constitue une réelle solution alternative à la surexploitation et à l'épuisement de ressources alluvionnaires surexploités.

Enfin, d'autres travaux de recherche menés dans l'esprit de la présente démarche apporteraient des résultats complémentaires à ceux obtenus ici. L'ensemble de ces éléments servirait alors à étendre la portée des outils de simulation proposés par BétonlabPro2, au niveau notamment des divers comportements caractérisant les bétons riches en fillers calcaires.

BIBLIOGRAPHIE

[Achour T., 2007], Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens, thèse ENIT Tunis / UHP Nancy, 208 p.

[Achour T., Lecomte A., Ben Ouezdou M., Mensi R., Joudi I., 2008], Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granat. Exemples tunisiens, *Materials and structures*, 41, 815-830.

[Achour T., Lecomte A., Ben Ouezdou M., Mensi R., 2008], Tensile strength and elastic modulus of calcareous concrete: application to Tunisians mixtures, *Materials and Structures Journal*, 41, 8, 1427-1439.

[Added M., Bedday A., 2003], Propriétés géotechniques des sables calcaires de concassage en Tunisie, *Annales de l'Équipement*, volume XIII-N°2, pp 7-31.

[Added M., 2005], Impact de la qualité des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 175 p.

[Akrouf K., Ltifi M., Ben Ouezdou M., 2010], Chloride diffusion in mortars – Effect of the use of limestone sand part I: Migration test, *International Journal of Concrete structures and materials*, Vol.4, N°2, 105-108.

[Akrouf K., Ltifi M., Ben Ouezdou M., 2010], Chloride diffusion in mortars – Effect of the use of limestone sand part II: Immersion test, *International Journal of Concrete structures and materials*, Vol.4, N°2, 109-112.

[Akrouf K., Mounaga P., Ltifi M., Ben Jemaa N., 2010], Rheological mechanical and structural performances of crushed limestone sand concrete, *International Journal of Concrete structures and materials*, Vol.4, N°2, 97-104.

[Aïtcin P.-C., Acker P. et Neville A., 1998], Les différents types de retrait du béton. Paris, LCPC, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n° 215.

[Ambroise J., Pera J., Rols S., 1997], Les bétons autonivelants, Annales du Bâtiments et des Travaux Publics, pp37-41.

[Antipolis S., 2000], Profil des pays méditerranéens, Tunisie-Enjeux et politiques d'environnement et de développement durable, Plan Bleu, Centre d'activités régionales.

[Bachiorrini A., Murat M., 1987], Evolution microstructurale des composites du système ciment alumineux-granat calcaire. II. Influence sur la porosité et les résistances mécaniques, Cement and Concrete Research, Vol 17, pp.397-403.

[Baroghel-Bouny V., 1994], Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, méthodes, analyse,interprétations, LCPC.

[Baron J., Lesage R., 1976], La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier. Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées N° 64.

[Baron J., Ollivier J P., 1996], Les bétons-Bases et données pour leur formulation, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles.

[Bedday A., 2000], Etude du sable calcaire de concassage et son utilisation dans le béton hydraulique, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 205p.

[Bedday A., Added M., 2003], Utilisation du sable calcaire de concassage dans le béton hydraulique, Annales de l'Equipement, volume XIII-N°2, pp 35-61.

[Benachour Y., Davy C.A., Skoczylas F., Houari H., 2008], Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar, Cement and Concrete Research 38, 727–736.

[Bentz, D.P., and Peltz, M.A., 2008], Reducing Thermal and Autogenous Shrinkage Contributions to Early-Age Cracking, ACI Materials Journal, **105** (4), 414-420.

[Bertrand R., Coquillat G., 1992], Les calcaires dans les bétons hydrauliques, CEBTP, pp. 6-13.

[Bosiljkov V.B., 2003], SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, *Cement and Concrete Research*, 33, 1279–1286.

[Bucher, B., 2009], Shrinkage and Cracking and its Relation to Cement Composition, MSCE Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.

[Bujalka P., Johan Z., Krivy M., Rakus M., Vacek J., 1971], Carte géologique de la Tunisie, Echelle : 1/50 000°, Feuille de GROMBALIA, N° 29.

[Buil M., Paillere A., 1984], Utilisation des fillers fins dans les bétons, *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur*, N°30, Paris, pp 193-196.

[Çelik T., Marar T., 1996], Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol 26, N°7, 1996, 1121-1130.

[Cimilli T., 1984], Influence de la teneur en éléments fins sur les propriétés des bétons, *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur*, N°30, Paris, pp 199-201.

[Coquillat G., Delfau M., Lesage R., 1984], Possibilité d'emploi des granulats calcaires de dureté moyenne à faible dans les bétons, *Bulletin de liaison des LPC - Spécial XIV*, pp125-131.

[Courard L., Michel F., Martin M., 2008], Valorisation des fillers calcaires dans la construction et le génie civil, *Reflexions*, le site de vulgarisation de l'Université de Liège.

[Cussigh F., 2000], Bétons Autoplaçants, recommandations provisoires, *Annales du Bâtiments et des Travaux Publics*.

[Dahir n° 1-02-130, 2002], promulgation de la loi N° 08-01 relative à l'exploitation des carrières, *Bulletin Officiel (Marocain)*, N° 5036, 908-914.

[Dale P. Bentz, Edgardo F. Irassar, Brooks Bucher, W. Jason Weiss, 2009], Limestone Fillers to Conserve Cement in Low w/cm Concretes: An Analysis Based on Powers' Model, Concrete International, 31 (11) and (12), 41-46 and 35-39.

[de Larrard F., 1999], Concrete mixture proportioning, A scientific approach, Modern concrete technology, 9, London.

[de Larrard F., Sedran T., 1999] Une nouvelle approche de la formulation des bétons, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 39-54.

[de Larrard F., 1999], Concrete Mixture-Proportioning – A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series No 9, E & FN SPON, Londres.

[de Larrard F., 2000], Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.

[de Larrard F., Sedran Th., 2007], Le logiciel BétonlabPro3, BLPC, n° 270-271, pp. 75-85.

[de Larrard, 2007], BétonlabFree 3, Leçon N°7, Cahier des charges, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre des Nantes.

[Detwiler R.J., Tennis P., 1996), The use of Limestone in Portland Cement : A state of the Art Review, Portland Cement Association, RP 118, 39 p., Skokie, IL.

[Données cartographiques, 2012], Google Maps - ©2012 Google.

[Donza H., Cabrera O., Irassar E.F., 2002], High-strength concrete with different fine aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 755-1761.

[Dreux G., 1970], Guide pratique du béton", Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

[Dreux G., Festa J., 1995], "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles.

[Données météo de la région de Tunis], <http://www.alloftunisia.com/meteo>.

[EFNARC, 2002], Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete”, EFNARC, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, February 2002, pp. 1-32.

[El Hilali A., 2009], Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants BAP : influence des fines calcaires et des fibres végétales, thèse de l’Université Cergy-Pontoise, 200p.

[Farran J., 1956], Contribution minéralogique à l’étude de l’adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.

[Farran, Javelas, Maso, Perrin, 1972], Etude de l’auréole de transition existant entre les granulats d’un mortier et la masse de la pâte de ciment hydraté. Colloque RILEM INSA TOULOUSE.

[Felekoglu B., 2006], A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete, Construction and Building Materials,1-9.

[Felekoglu B.,2007], Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources, Conservation and Recycling, 1-22.

[Guemmadi Z., Resheidat M., Houari H., Toumi B., 2008], A better use of limestone filler in concrete, International Conference on Construction and Building Technology, ICCBT, 307-318.

[Guemmadi Z., Resheidat M., Houari H., Toumi B., 2008], Optimal criteria of algerian blended cement using limestone fines, Journal of Civil Engineering and Management, 14(4): 269-275.

[Instruction interministérielle, 2007], instruction interministérielle portant sur les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et

enrobés bitumineux, Le Bulletin de l'Habitat, Bulletin d'information du Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme N°2, 26-27.

[Joudi I., 2005], Effet de la topologie des granulats sur la résistance à la compression du béton hydraulique, Mastère en Matériaux, Sols et Structures, ENIT.

[Lecomte A., 1998], Ajustement des méthodes de formulation de béton au m³ en tenant compte du volume réel, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics N°5, Octobre-Novembre, pp. 13-26.

[Lecomte A., Mechling J.-M., Diliberto-Jeannot C., 2009], Compaction index of cement paste of normal consistency, Construction and building materials, 23, 3279-3286.

[Loi N° 05-12, 2005], loi relative à l'eau, Art. 14, Journal Officiel De La République Algérienne, N° 60, 3-18.

[Manuel Technique, 2011], Spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux en Tunisie, en cours d'édition.

[MEHAT, 2000], Ministère de l'Équipement et de l'Habitat - Direction des Carrières et des Explosifs, Contrôle et assurance de la qualité, Séminaire sur les matériaux de construction, Tunis, 2 et 3 Mai, 17 p.

[MEHAT, 2011], Valorisation des sables calcaires du sud Tunisien, Maître d'ouvrage : Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, projet élaboré par le bureau d'Innovation and Consulting in Engineering ICE en collaboration avec le Laboratoire de Génie Civil LGC de l'ENIT, 86p.

[Menadi B., Kenai S., Khatib J., Ar't-Mokhtar A., 2009], Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, Construction and Building Materials, 23, 625-633.

[Mensi R., Karray M., Rouis Z., 2003], Vers de nouveaux bétons en Tunisie : les bétons à haute performances et autoplacants, Annales de l'Équipement, volume XIII-N°2.

[Norme NF EN 933-1, 1997], Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 10 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR

[Norme NF EN 12350-2, 1999], Essai pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement, Décembre, AFNOR

[Norme NF EN 12620, 2000], Granulats pour bétons, AFNOR.

[Norme NF EN 206-1, 2004], Béton, partie 1 : spécifications, performances, production et conformité, Afnor, Paris.

[Norme NF EN 1992-1, 2005], Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments, AFNOR.

[Norme NF EN 196-1, 2006], Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques, AFNOR.

[Norme NF P 18-411, 1981], Bétons - Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs.

[Norme NF P 18-412, 1981], Bétons - Caractéristiques particulières des machines hydrauliques pour essais de compression (presses pour matériaux durs).

[Norme NF P 18-573, 1990], Granulats, Essai Los Angeles, Afnor.

[Norme NF P 18-592, 1990], Granulats - Essai au bleu de méthylène, méthode à la tâche, AFNOR.

[Norme NF P 18-416, 1994], Béton –Surfaçage au soufre des éprouvettes cylindriques, AFNOR.

[Norme NF P 18-508, 1995], Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, Afnor, Paris.

[Norme NF P 18.305, 1996], Béton – Béton prêt à l'emploi, Août, AFNOR.

[Norme NM 10.1.165, 1995], Le sable de concassage pour béton hydraulique - Spécifications, Norme Marocaine, Ministère du Commerce de l'Industrie, 1-7.

[Norme NT 21.04, 1984], Granulats - Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux", INNORPI.

[Norme NT 21.05, 1984], Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, INNORPI.

[Norme NT 21.25, 1990], Granulats - Détermination de la propreté superficielle, INNORPI.

[Norme NT 21.26, 1990], Granulats - Détermination de la propreté des sables –Equivalent de sable à 10 % de fines, INNORPI.

[Norme NT 21.94, 1990], Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines, INNORPI.

[Norme NT 21.113, 1990], Béton – Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, INNORPI.

[Norme NT 21.115, 1990], Béton – Détermination de la résistance à la traction par fendage des éprouvettes, INNORPI.

[Norme NT 21.127, 1990], Granulats - Détermination de la masse volumique en vrac, INNORPI.

[Norme Norme NT 47.30, 1991], Ciments - Détermination des résistances mécaniques, INNORPI

[Norme NT 21.30, 2002], Granulats - Définitions, conformités, spécifications, INNORPI.

[Norme XP P 18-545, 2008], Granulats – Eléments de définition, conformité, codification, Afnor, Paris.

[N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis, S. Tsivilis, 2005], Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cement,. Cement and Concrete.Composites, 27, pp.191–196.

[Oluokun F.A., 1991], Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 88, N° 3, pp. 302-309.

[Poppe A.M., De Schutter G., 2005], Cement hydration in the presence of high fillers contents, Cement and Concrete Research, 35, 2290—2299.

[Parmentier B., Pollet V., Zarmati G., 2009], Retrait empêché du béton, Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution, Les Dossiers du CSTC – N° 2 – Cahier n° 3.

[Remillon A.], connaissance du couple liant-granulats

[Rmili A., 2010], Étude de formulation et de comportement des bétons autoplaçants : Incorporation du sable de concassage et du sable de désert, Thèse ENIT, 226 p.

[Sadhouari F., Goufi N., Guezzouli A., 2009], Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons, 1st International Conference SBEIDCO, ENSET Oran, 247-254.

[Schwartzentruber A., 2000], Catherine C., La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, Materials and Structures, 33, 475-482.

[Sedran T.] Les bétons autonivelants, BAN, synthèse bibliographiques, BLPC, N° 196, pp 53-60.

[Sedran Th., De Larrard F., 2000], BétonlabPro2 – Logiciel de formulation de bétons – version exécutable sous Windows, logiciel sur CD ROM avec aide en ligne, Presses de l’Ecole nationale des ponts et chaussées.

[Sika], ViscoCrete Tempo 12, Superplastifiant/Haut réducteur d’eau polyvalent pour bétons prêts à l’emploi.

[Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus, Yoon-moon Chun, Fethullah Canpolat, Bruce W. Ramme, 2005], Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete, Three-Day International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, October 5-7, Toronto, CANADA.

[UNPG, CEBTP, LCPC, 1990], Valorisation et pleine emploi des matériaux calcaires, opération 52 EG 125.

[Zneidi S., 2007], mastère de recherches portant sur l’influence des phénomènes et des conditions géologiques sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des roches exploitées pour la production des granulats, Faculté des Sciences de Tunis.

Résumé

L'objectif de la thèse est d'étudier l'effet de la quantité de fillers vis-à-vis des propriétés rhéologiques, mécaniques et dimensionnelles de bétons tout calcaire. Ces bétons ont été confectionnés avec les mêmes gravillons et le même sable provenant de la même production, afin d'éviter tout artéfact. Le sable a servi à fabriquer cinq sables représentatifs des catégories définies dans la norme EN 12260 des granulats à bétons, par mélange avec sa fraction fine ou sa fraction grenue extraites préalablement par lavage. Les sables fabriqués contiennent environ 0, 6, 12, 18 et 24% de fillers. Les bétons ont été formulés avec le logiciel BetonlabPro2, dont les algorithmes prennent en compte la présence des fillers calcaires. Les bétons ont été réalisés tout d'abord sans superplastifiant, puis en présence d'un superplastifiant dosé à 2/3 de la saturation. Les résultats obtenus ont montré qu'une quantité de fillers de 100 à 130 kg/m³ pour les bétons courants et de 60 à 80 kg/m³ pour les bétons superplastifiés, permet d'obtenir des propriétés optimales, à consistance égale. Mais des quantités supérieures de fillers n'altèrent pas significativement les propriétés des bétons, même si leur compacité diminue. On explique ce comportement non seulement par l'effet liant attribué aux fillers calcaires, mais aussi par une amélioration de la liaison pâte granulats. Les mélanges contenant les plus forts taux de fillers ont encore été étudiés pour formuler des bétons autoplaçants BAP, qui nécessitent une grande quantité de fillers. Les sables de concassage apportent alors la majeure partie de ce constituant, ce qui leur ouvre une voie nouvelle d'utilisation.

Mots clés : Fillers calcaires, bétons calcaires, granulats concassés, compression, traction, variations dimensionnelles.

Abstract

The objective of this work is to study the effect of the quantity of fillers on the rheological, mechanical and dimensional properties of calcareous concretes. These concretes were made with the same coarse aggregates and same sand coming from the same production, in order to avoid any artifact. Sand was used to manufacture five sands representative of the categories defined in the EN 12260 norm for aggregates for concretes, by mixture with its fine fraction or its grained fraction extracted beforehand by washing. The employed sands contain approximately 0, 6, 12, 18 and 24 % of fillers. The concretes were formulated with the BetonlabPro2 software, whose algorithms take into account the presence of the fillers limestones. Concretes were realized at first without superplastifiant, then in the presence of a superplastifiant measured in 2/3 of saturation. The obtained results showed that a quantity of fillers limestones from 100 to 130 kg/m³ for the concretes and from 60 to 80 kg / m³ for superplasticized concretes allows obtaining optimal properties, in equal consistency. But, higher quantities of fillers do not deteriorate significantly the properties of the concretes, even if their packing density decreases. One explains this behavior not only by the binding effect allotted to the fillers limestones, but also by an improvement of the paste-aggregates bond. Mixtures containing the strongest rates of fillers were again studied to formulate self compacting concretes SCC, which require a big quantity of fillers. Crushed sands bring then the major part of this constituent, what opens to them a new way of use.

Key words: Fillers limestones, calcareous concretes, crushed aggregates, compressive strength, tensile strength, dimensional variations.