

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

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Civil & Hydraulique
Réf.:



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en sciences

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux de construction

**DÉVELOPPEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS
À HAUTES PERFORMANCES :
INFLUENCE DE LA COMPOSITION**

Présentée par :

Brahim NÉCIRA

Soutenue publiquement le : 29/11/2018

Devant le jury composé de :

MEZGHICHE Bouzidi	Maître de conférences 'A'	Président	Université de Biskra
GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
TAALLAH Bachir	Maître de conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
BEDERINA Madani	Professeur	Examineur	Université de Laghouat
MAKHLOUFI Zoubir	Maître de conférences 'A'	Examineur	Université de Laghouat
BENCHEIKH Boubakeur	Maître de conférences 'A'	Examineur	Université de Djelfa

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur GUETTALA Abed El Hamid, Professeur à l'Université de Biskra, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail.

J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres du jury, Messieurs ; MEZGHICHE Bouzidi, TAALLAH Bachir, BEDERINA Madani, MAKHLOUFI Zoubir et BENCHEIKH Boubakeur, qui m'ont donné l'honneur d'accepter de juger ce travail.

RÉSUMÉ

Titre de la Thèse : Développement des bétons autoplaçants à hautes performances : Influence de la composition

Le BAPHP est un béton très maniable qui peut remplir tous les coffrages sans aucune vibration, tout en restant stable et garantissant de hautes résistances mécaniques. Sa formulation est critique aux termes des constituants et dosages, dont le sable approprié et un fort dosage en ciment sont indispensables. Cependant, l'Algérie souffre de l'épuisement des gisements naturels, ce qui nécessite la valorisation d'autres matériaux disponibles et moins coûteux, qui pourraient apporter des solutions alternatives intéressantes.

La présente thèse a pour objectif de développer une série de BAPHP à base de sable de carrière, sable de dune, filler calcaire, pouzzolane naturelle, et laitier granulé, tout en étudiant les effets de leur incorporation sur les paramètres de la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité), ainsi que les résistances mécaniques (résistances à la compression à 7, 28 et 90 jours et résistance à la traction à 28 jours) de BAPHP.

Les résultats obtenus prouvent que la substitution de sable de rivière par l'incorporation de sable de carrière, avec dosage modéré ($\leq 40\%$), et de sable de dune, avec dosage faible ($\leq 20\%$), ayant un effet positif sur la compacité, les propriétés rhéologiques et les résistances mécaniques du BAPHP. Également, en remplaçant le ciment par les additions minérales, les teneurs volumiques de 30% filler, 30% pouzzolane et 20% laitier offrent des meilleures propriétés rhéologiques tout en assurant des hautes résistances mécaniques du BAPHP.

Ces résultats sont très intéressants aux aspects ; technologique, économique et environnemental.

Mots clé : BAPHP – Fluidité – Déformabilité – Stabilité – Résistance – Sable de rivière – Sable de carrière – Sable de dune – Filler calcaire – Pouzzolane naturelle – Laitier granulé.

ABSTRACT

**Title of Thesis: Development of self-compacting high performance concretes:
Influence of composition**

The SCCHP is a highly flowable concrete that can fill all forms without any vibration, while remaining stable and ensuring high mechanical strengths. Its formulation is critical in terms of constituents and dosages, of which suitable sand and a high dosage of cement are essential. However, Algeria suffers from the depletion of natural deposits, which requires the valuation of other available and less expensive materials, which could provide interesting alternative solutions.

The objective of this thesis is to develop a series of SCCHP based on quarry sand, dune sand, limestone filler, natural pozzolana, and granulated slag, while studying the effects of their incorporation on the parameters of workability (fluidity, deformability and stability), as well as the mechanical strengths (compressive strengths at 7, 28 and 90 days and tensile strength at 28 days) of BAPHP.

The results obtained show that the replacement of river sand by the incorporation of quarry sand, with moderate dosage ($\leq 40\%$), and sand dune, with low dosage ($\leq 20\%$), having a positive effect on the compactness, rheological properties and mechanical strengths of BAPHP. Also, by replacing the cement with the mineral additions in volume contents, the 30% filler, 30% pozzolana and 20% slag, offer better rheological properties while ensuring high mechanical strengths of the BAPHP.

These results are very interesting in the technological, economic and environmental aspects.

Key words: BAPHP – Flowability – Deformability – Stability – Strengths – River sand – Quarry sand – Dune sand – Limestone filler – Natural pozzolana – Granulated slag.

عنوان الأطروحة: تطوير خرسانة ذاتية القوية وعالية الأداء: تأثير التركيبة

إن الخرسانة ذاتية القوية وعالية الأداء (خ ذ ق ع أ) عبارة عن خرسانة ذات انسيابية قصوى يمكن أن تملأ جميع القوالب بدون أي اهتزاز، بينما تبقى ثابتة وتضمن مقاومات ميكانيكية عالية. صياغتها حاسمة من حيث المكونات والتراكيز، والتي يجب أن تحتوي على رمال مناسبة وتركيز عالي من الاسمنت. إلا أن الجزائر تعاني من نقص الموارد الطبيعية، الأمر الذي يتطلب تقييم المواد الأخرى المتاحة والأقل تكلفة، والتي يمكن أن توفر حلول بديلة مثيرة للاهتمام.

وتهدف هذه الأطروحة إلى تطوير سلسلة من (خ ذ ق ع أ) على أساس رمل المحجر، رمل الكثبان، مسحوق الكلس، بزولان الطبيعي وخبث الحبيبي، وهذا بدراسة آثار إدماجها على خصائص (اللدونة، التشوه والاستقرار)، فضلا عن المقاومات الميكانيكية (قوة مقاومة الضغط في 7, 28 و90 يوما ومقاومة الشد في 28 يوما) من (خ ذ ق ع أ).

النتائج المتحصل عليها تثبت أن استبدال رمل الوادي برمل المحجر بتركيز معتدل ($\geq 40\%$) ورمل الكثبان الرملية بتركيز منخفض ($\geq 20\%$)، له تأثير إيجابي على التراص، الخصائص الريولوجية والمقاومات الميكانيكية ل (خ ذ ق ع أ). بالإضافة، تبديل الاسمنت بالإضافات المعدنية، مع محتوى حجمي 30% مسحوق الكلس، 30% بزولان الطبيعي و20% خبث الحبيبي تقدم أفضل خصائص الريولوجية مع الحفاظ على مقاومات ميكانيكية عالية من (خ ذ ق ع أ).

هذه النتائج مثيرة للاهتمام للغاية من الجوانب التكنولوجية والاقتصادية والبيئية.

الكلمات المفتاحية: (خ ذ ق ع أ) – لدونة – تشوه – استقرار – مقاومات – رمل الوادي – رمل المحجر – رمل الكثبان – مسحوق الكلس – بزولان الطبيعي – خبث الحبيبي.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
ملخص	iv
SOMMAIRE	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES PHOTOS	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : CONCEPT ET CARACTÉRISATION DE BAPHP ...	4
1.1 Introduction	4
1.2 Concept de BAPHP	5
1.2.1 Cahier de charges	5
1.2.2 Structure	6
1.3 Caractérisation à l'état frais	10
1.3.1 Essais de fluidité	11
1.3.1.1 Étalement au cône d'Abrams	11
1.3.1.2 Écoulement à l'entonnoir en V	11
1.3.1.3 Boîte de LCPC	12
1.3.1.4 Orimet	12
1.3.2 Essais de déformabilité	13
1.3.2.1 Boîte en L	13
1.3.2.2 Écoulement à l'anneau	14
1.3.2.3 Boîte en U	15
1.3.2.4 Caisson de Kajima	15
1.3.3 Essais de stabilité	16
1.3.3.1 Stabilité au tamis	16
1.3.3.2 Ségrégation à la colonne	17
1.3.3.3 Pénétration au cylindre	18
1.3.3.4 Tassement de surface	19
1.3.4 Autres essais	20
1.3.5 Discussion d'essais	21
1.4 Comportement rhéologique	21
1.4.1 Rhéomètre	21
1.4.2 Propriétés rhéologiques	22
1.5 Propriétés mécaniques	23
1.5.1 Résistance à la compression	23
1.5.2 Résistance à la traction	24

1.5.3	Déformabilités	24
1.6	Conclusion.....	25

CHAPITRE 2 : REVUE DES MÉTHODES DE FORMULATION DES BAP-BAPHP 27

2.1	Introduction	27
2.2	Pratique de la formulation de BAPHP	28
2.3	Méthodes de formulation de BAP	28
2.3.1	Approche d'optimisation du mortier.....	30
2.3.1.1	Méthode Japonaise de mortier optimisé	30
2.3.1.2	Autres méthodes d'optimisation du mortier	33
2.3.2	Approche d'optimisation de la pâte	34
2.3.2.1	Méthode de critères de non blocage et de fluidité	34
2.3.2.2	Autres méthodes d'optimisation de la pâte.....	36
2.3.3	Approche d'optimisation du squelette granulaire	37
2.3.3.1	Méthode de modèle d'empilement compressible	37
2.3.3.2	Autres méthodes d'optimisation du squelette granulaire	39
2.3.4	Approche d'optimisation de la résistance à la compression	40
2.3.4.1	Méthode de critère de résistance.....	41
2.3.4.2	Autres méthodes d'optimisation de la résistance à la compression	42
2.3.5	Approche du plan d'expérience	44
2.3.5.1	Méthode de plan factoriel	44
2.3.5.2	Autres méthodes du plan d'expérience.....	45
2.4	Conclusion	45

CHAPITRE 3 : INFLUENCE DE COMPOSITION SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP-BAPHP 47

3.1	Introduction	47
3.2	Incorporation des sables	47
3.2.1	Incorporation du sable de carrière dans le BO.....	48
3.2.2	Incorporation du sable de dune dans le BO	49
3.2.3	Alternative de substituer le SR par le SC et le SD dans le BAP.....	50
2.3.1.1	Effets de combinaison des sables sur la composition	51
2.3.1.2	Effets de combinaison des sables sur la maniabilité.....	52
2.3.1.3	Effets de combinaison des sables sur les résistances mécaniques	54
2.4	Incorporation des additions minérales	54
2.4.1	Valorisation des additions minérales locales	55
2.4.1.1	Filler calcaire.....	56
2.4.1.2	Pouzzolane naturelle.....	57
2.4.1.3	Laitier granulé	58
2.4.2	Facteur d'efficacité des additions minérales.....	60
2.5	Conclusion	61

CHAPITRE 4 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS .. 63

4.1	Introduction	63
4.2	Matériaux utilisés	63
4.2.1	Graviers.....	63
4.2.2	Sables.....	64
4.2.3	Ciment.....	66
4.2.4	Additions minérales.....	68
4.2.5	Superplastifiant.....	70
4.2.6	Eau de gâchage	70
4.3	Essais réalisés.....	70
4.3.1	Essais des Compacités	71
4.3.1.1	Compacité lâche des granulats	71
4.3.1.2	Compacité serrée des granulats	71
4.3.1.3	Compacité des bétons frais.....	72
4.3.2	Essais sur pâte et mortier	73
4.3.2.1	Étalement de pâte au mini-cône de Kantro.....	73
4.3.2.2	Étalement de mortier au mini-cône de Haegermann.....	73
4.3.2.3	Écoulement de mortier au mini-entonnoir.....	74
4.3.2.4	Résistance à la compression de mortier.....	75
4.3.3	Essais sur béton frais	75
4.3.3.1	Étalement au cône d'Abrams.....	75
4.3.3.2	Écoulement à la boîte LCPC	75
4.3.3.3	Boîte en L	76
4.3.3.4	Stabilité au tamis :	76
4.3.4	Essais sur béton durci	77
4.3.4.1	Résistance à la compression	77
4.3.4.2	Résistance à la traction par flexion.....	78
4.4	Conclusion.....	78

**CHAPITRE 5 : EFFET DES SABLES SUR LES PROPRIÉTÉS
DE BAPHP**

5.1	Introduction	79
5.2	Compacités des granulats	80
5.2.1	Compacités lâches et serrées des graviers	80
5.2.2	Compacité lâche des Sables.....	82
5.2.3	Compacité serrée des Sables.....	83
5.3	Formulation de BAPHP.....	84
5.4	Effet des sables sur la compacité de BAPHP frais	88
5.5	Effet des sables sur la maniabilité de BAPHP	90
5.5.1	Effet des sables sur la fluidité.....	90
5.5.2	Effet des sables sur la déformabilité.....	92
5.5.3	Effet des sables sur la stabilité.....	93

5.6	Effets des sables sur les résistances mécaniques.....	94
5.6.1	Effets des sables sur les résistances à la compression	94
5.6.2	Effets des sables sur la résistance à la traction.....	95
5.7	Conclusion.....	97
CHAPITRE 6 : EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES PROPRIÉTÉS DE BAPHP		99
6.1	Introduction	99
6.2	Étapes et paramètres de l'étude.....	100
6.3	Optimisation rhéologique à l'échelle de la pâte.....	101
6.3.1	Demande en eau pour les fines simples	102
6.3.2	Demande en eau pour les liants binaires.....	104
6.3.3	Efficacité du superplastifiant pour le ciment	106
6.3.4	Demande en superplastifiant pour les liants binaires.....	108
6.4	Optimisation à l'échelle du mortier	109
6.4.1	Développement du MAPHP de référence.....	110
6.4.2	Optimisation rhéologique du MAPHP.....	111
6.4.2.1	Besoin en eau et en superplastifiant du MAPHP de ciment	111
6.4.2.2	Fluidité du MAPHP avec additions minérales.....	116
6.4.3	Optimisation mécanique du MAPHP avec additions minérales.....	123
6.4.3.1	Résistance à la compression à 28 jours du MAPHP avec additions minérales.....	125
6.4.3.2	Indice d'activité à 28 jours du MAPHP avec additions minérales	126
6.4.3.3	Facteur d'efficacité volumique à 28 jours du MAPHP avec additions minérales	127
6.5	Optimisation à l'échelle du béton.....	132
6.5.1	Développement du BAPHP de référence.....	132
6.5.2	Formulation du BAPHP avec additions minérales	134
6.5.3	Effet des additions minérales sur les paramètres de la maniabilité du BAPHP.....	136
6.5.3.1	Effet des additions minérales sur la fluidité.....	136
6.5.3.2	Effet des additions minérales sur la déformabilité.....	139
6.5.3.3	Effet des additions minérales sur la stabilité	141
6.5.4	Effet des additions minérales sur les résistances mécaniques du BAPHP.....	141
6.5.4.1	Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 7 jours	141
6.5.4.2	Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 28 jours	143
6.5.4.3	Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 90 jours	144
6.5.4.4	Effet des additions minérales sur la résistance à la traction à 28 jours.....	145
6.5.4.5	Effet des additions minérales sur le rapport de la ductilité à 28 jours	146
6.6	Conclusion.....	147
CONCLUSION GÉNÉRALE		150
BIBLIOGRAPHIE		153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Sommaire des méthodes de formulation de BAP	29
Tableau 2.2 : Coefficient du calcul de dosage en graviers de la méthode [Sakata & al.].....	42
Tableau 2.3 : Teneur en agent de viscosité en fonction des E/C et S/A de la méthode [Sakata & al.]	42
Tableau 4.1 : Propriétés physiques des graviers	64
Tableau 4.2 : Propriétés physiques des sables	65
Tableau 4.3 : Propriétés physiques du ciment	67
Tableau 4.4 : Résistances caractéristiques du ciment.....	67
Tableau 4.5 : Composition chimique du ciment.....	67
Tableau 4.6 : Composition minéralogique du ciment.....	67
Tableau 4.7 : Propriétés physiques des additions minérales.....	69
Tableau 4.8 : Composition chimique des additions minérales	69
Tableau 5.1 : Formulation des BAPHP pour la combinaison SC/(SC+SR)	87
Tableau 5.2 : Formulation des BAPHP pour la combinaison SD/(SD+SR).....	88
Tableau 5.3 : Formulation des BAPHP pour la combinaison SC/(SC+SD).....	89
Tableau 6.1 : Composition des pâtes du ciment de l'optimisation de dosage en superplastifiant	107
Tableau 6.2 : Composition des pâtes du liant binaire de l'optimisation de dosage en superplastifiant	108
Tableau 6.3 : Formulation de MAPHP de référence à base de ciment	111
Tableau 6.4 : Formulation des MAPHP du ciment pour l'optimisation rhéologique	112
Tableau 6.5 : Formulation des MAPHP du filler calcaire pour l'optimisation rhéologique	117
Tableau 6.6 : Formulation des MAPHP de la pouzzolane naturelle pour l'optimisation rhéologique	117
Tableau 6.7 : Formulation des MAPHP du laitier granulé pour l'optimisation rhéologique.....	118
Tableau 6.8 : Dosages de MAPHP à base de filler calcaire pour l'optimisation mécanique.....	124
Tableau 6.9 : Dosages de MAPHP à base de pouzzolane pour l'optimisation mécanique.....	124
Tableau 6.10 : Dosages de MAPHP à base de laitier granulé pour l'optimisation mécanique.....	124
Tableau 6.11 : Formulation de BAPHP de référence à base de ciment	134
Tableau 6.12 : Dosages de BAPHP à base de filler calcaire	135
Tableau 6.13 : Dosages de BAPHP à base de pouzzolane naturelle.....	135
Tableau 6.14 : Dosages de BAPHP à base de laitier granulé	136

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Blocage des graviers au droit des obstacles lors de coulage du béton	6
Figure 1.2 : Comparaison des structures de BAPHP et BO.....	7
Figure 1.3 : Essai de l'étalement au cône d'Abrams	12
Figure 1.4 : Essai de l'entonnoir en V	12
Figure 1.5 : Essai de la boîte LCPC.....	13
Figure 1.6 : Essai de l'Orimet.....	13
Figure 1.7 : Essai de la boîte en L	14
Figure 1.8 : Essai de l'étalement à l'anneau	14
Figure 1.9 : Essai de la boîte en U	16
Figure 1.10 : Essai du caisson de remplissage.....	16
Figure 1.11 : Essai de la stabilité au tamis.....	18
Figure 1.12 : Essai de la ségrégation à la colonne	18
Figure 1.13 : Essai de la pénétration au cylindre.....	19
Figure 1.14 : Essai du tassement de surface	19
Figure 1.15 : Types de rhéomètres à béton [Koehler & Fowler].....	22
Figure 1.16 : Rhéogrammes de BAP et BHP [de Larrard & al. ¹].....	23
Figure 1.17 : Résistances à la compression à 28 j de BAP de 41 publications [Desnerck & al.]	24
Figure 2.1 : Dimensions de mini-cône de Haegermann destiné à l'étalement de mortier	31
Figure 2.2 : Dimensions de mini-entonnoir en V destiné à l'écoulement de mortier	32
Figure 2.3 : Relation entre l'écoulement relatif R_m et l'étalement relatif Γ_m pour différents dosages en superplastifiant et différents rapports volumiques Eau/Liant [Ouchi & al.].....	32
Figure 2.4 : Écoulement relatif R_m en fonction de l'étalement relatif Γ_m – Recherche du couple optimal superplastifiant-eau [Turcry].....	32
Figure 2.5 : Volume limite de non blocage V_{bi} des granulats en fonction e_{di} [Turcry]	35
Figure 3.1 : Porosités en fonction des combinaisons des sables [Rmili]	51
Figure 3.2 : Courbe ternaire de la réponse de densité apparente des combinaisons de sables (SR ; SC ; SD) en fonction de leurs proportions massiques [Bouziani & al.].....	52
Figure 4.1 : Analyse granulométrique des graviers	64
Figure 4.2 : Analyse granulométrique des sables	66
Figure 4.3 : Analyse de diffractomètre des rayons X (DRX) des sables	66
Figure 4.4 : Analyse granulométrique à laser du ciment	67
Figure 4.5 : Analyse de diffractomètre des rayons X (DRX) du ciment	68
Figure 4.6 : Analyse granulométrique à laser des additions minérales.....	69
Figure 4.7 : Analyse de diffractomètre des rayons X (DRX) des additions minérales.....	69

Figure 5.1 : Compacités lâches et serrées en fonction de combinaison massique de deux classes granulaires de graviers.....	81
Figure 5.2 : Compacité lâche en fonction des combinaisons massiques de différents types des sables	83
Figure 5.3 : Compacité serrée en fonction des combinaisons massiques de différents types des sables	84
Figure 5.4 : Compacité du BAPHP frais en fonction des combinaisons massiques des sables	90
Figure 5.5 : Fluidité du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables	91
Figure 5.6 : Déformabilité du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables	92
Figure 5.7 : Stabilité du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables	93
Figure 5.8 : Résistance à la compression à 7 j du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables	95
Figure 5.9 : Résistance à la compression à 28 j du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables	95
Figure 5.10 : Résistance à la traction à 28 j du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables	96
Figure 6.1 : Modèles linéaires d'étalement relatif Γ_p de la pâte en fonction de rapport volumique e/l pour différentes types des fines (C ; FC ; PN ; LG).....	103
Figure 6.2 : Modèles linéaires d'étalement relatif Γ_p de la pâte en fonction de rapport massique E/L pour différentes types des fines (C ; FC ; LG ; PN).....	104
Figure 6.3 : Ratio d'eau retenu β_p de la pâte en fonction de taux volumique en additions minérales.....	105
Figure 6.4 : Compacité expérimentale C_{exp} de la pâte en fonction de taux volumique en additions minérales	106
Figure 6.5 : Étalement relatif de la pâte de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports e/c	107
Figure 6.6 : Étalement relatif de la pâte du liant binaire en fonction de dosage en superplastifiant pour différentes additions minérales.....	109
Figure 6.7 : Étalement relatif Γ_m et temps relatif d'écoulement $LogT_m$ du MAPHP de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports e/c	113
Figure 6.8 : Corrélation linéaire entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $LogT_m$ du MAPHP de ciment en fonction de rapport e/c pour dosages constants en superplastifiant.....	114
Figure 6.9 : Corrélation linéaire entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $LogT_m$ du MAPHP de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour rapports constants e/l	115
Figure 6.10 : Besoin en eau du MAPHP du ciment pour des fluidités données en fonction de dosage en superplastifiant	115
Figure 6.11 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHP à base des différentes teneurs en filler calcaire en fonction de dosage en superplastifiant.....	120
Figure 6.12 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHP à base des différentes teneurs en pouzzolane naturelle en fonction de dosage en superplastifiant.....	120

Figure 6.13 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHP à base des différents teneurs en laitier granulé en fonction de dosage en superplastifiant.....	120
Figure 6.14 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHP en fonction de teneur de différentes additions minérales pour la dose de saturation en superplastifiant SP*	121
Figure 6.15 : Corrélation linéaire entre l'étalement relatif T_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ des MAPHP à base du ciment et d'additions minérales pour différents dosages en superplastifiant	122
Figure 6.16 : Résistance à la compression à 28 j du MAPHP en fonction des additions minérales	126
Figure 6.17 : Indice d'activité à 28 j du MAPHP en fonction des additions minérales.....	127
Figure 6.18 : Facteur d'efficacité volumique calculé par les modèles de Féret et Bolomey en fonction des additions minérales.....	131
Figure 6.19 : Effet des additions minérales sur la fluidité par l'étalement du BAPHP	137
Figure 6.20 : Effet des additions minérales sur la fluidité par le temps d'étalement du BAPHP	138
Figure 6.21 : Effet des additions minérales sur la fluidité par la longueur d'écoulement du BAPHP	139
Figure 6.22 : Corrélation de longueur d'écoulement à la boîte LCPC et l'étalement au cône d'Abrams pour les additions minérales dans le BAPHP	139
Figure 6.23 : Effet des additions minérales sur la déformabilité par le taux de remplissage de BAPHP .	140
Figure 6.24 : Corrélation de taux de remplissage à la boîte en L et l'étalement au cône d'Abrams pour les additions minérales dans le BAPHP	140
Figure 6.25 : Effet des additions minérales sur la stabilité par l'indice de ségrégation de BAPHP	141
Figure 6.26 : Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 7 j du BAPHP.....	142
Figure 6.27 : Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 28 j du BAPHP.....	143
Figure 6.28 : Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 90 j du BAPHP.....	144
Figure 6.29 : Effet des additions minérales sur la résistance à la traction à 28 j du BAPHP.....	145
Figure 6.30 : Effet des additions minérales sur le rapport de la ductilité du BAPHP.....	147

LISTE DES PHOTOS

Photo 4.1 : Essai de la compacité lâche des granulats (graviers et sable).....	71
Photo 4.2 : Essai de la compacité serrée des granulats (graviers et sables).....	72
Photo 4.3 : Essai de la compacité des bétons frais	73
Photo 4.4 : Essai de mini-cône de Kantro.....	73
Photo 4.5 : Essai de mini-cône de Haegermann	74
Photo 4.6 : Essai de mini entonnoir en V à mortier.....	74
Photo 4.7 : Déroulement de l'essai de l'étalement au cône d'Abrams	76
Photo 4.8 : Déroulement de l'essai de la boîte LCPC	76
Photo 4.9 : Déroulement de l'essai de la boîte en L	76
Photo 4.10 : Déroulement de l'essai de la stabilité au tamis	77

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans l'histoire du béton, la création de Béton à Hautes Performances (BHP) et puis la création de Béton AutoPlaçant (BAP) sont les plus deux importants innovations et progrès de ce matériau, le premier par ses hautes propriétés mécaniques et le second par ses hautes propriétés rhéologiques. Or, les ouvrages modernes se caractérisent par des formes élancées et complexes nécessitant le coulage des bétons a priori de hautes résistances dans des coffrages minces et fortement ferraillés, ce qui rend l'application de l'un de ces bétons spéciaux à ce genre de constructions très difficile ; le BHP par le manque de haute maniabilité et le BAP par l'insuffisance de hautes résistances mécaniques.

L'idée de réunir les propriétés de BAP à l'état frais et les performances de BHP à l'état durci semble donc intéressante. C'est ainsi que le Béton AutoPlaçant à Hautes Performances (BAPHP) est né. Avec cette nouvelle génération (BAPHP), le matériau béton a franchi une autre étape très importante dans le monde de construction, par l'ensemble de ses hauts paramètres de maniabilité et ses hautes résistances mécaniques.

Le BAPHP est un béton très maniable qui peut remplir tous les coffrages sans aucun moyen de serrage, tout en restant stable et garantissant de hautes résistances mécaniques. Différent du Béton Ordinaire (BO), le BAPHP doit répondre à un cahier de charges plus compliqué en états frais et durci au même temps. Il doit avoir un grand étalement, une bonne capacité de remplissage, une meilleure résistance à la ségrégation, et en plus, il doit posséder une haute résistance en compression.

De telles performances sont assurées par une formulation très exigeante aux termes des constituants et dosages. Elle privilège la pâte du liant au détriment aux graviers et se caractérise donc par un squelette granulaire plus fin. En effet, La formulation de BAPHP contient plus des fines, avec un fort dosage en ciment et en additions minérales, moins de graviers de petites dimensions, avec un sable approprié, une dose importante en superplastifiant, et parfois une fumée de silice ou un agent de viscosité.

Bien qu'il apporte beaucoup d'avantages au monde de construction, comme le gain du temps et la main d'œuvre et la réduction de nuisances sonores lors de sa mise en place, le

BAPHP reste relativement couteux par rapport aux autres bétons à cause de sa formulation, notamment les quantités élevées de ciment et superplastifiant et l'utilisation de fumée de silice et le sable approprié.

En effet, la pratique usuelle de la formulation du béton est de recourir à des constituants de bonnes caractéristiques. Par exemple la plupart des BAP et BHP sont exclusivement fabriqués avec de sable de rivière ayant de bonnes qualités. Cependant, le monde de construction souffre d'un manque important en ce type de sable approprié. L'Algérie, comme beaucoup de pays du monde, se trouve dans ce problème lié à l'épuisement des gisements alluvionnaires, et même à l'impact écologique de leur exploitation. En revanche, le sable concassé coproduit énormément par les carrières, ainsi que le sable de dunes disponible de quantités inépuisables dans le sud du pays, ne sont pas encore exploités sérieusement dans la formulation des bétons de hautes qualités.

Par ailleurs, l'incorporation des additions minérales, moins couteuses et plus écologiques que le ciment, reste toujours modeste dans les bétons spéciaux, et l'utilisation de la fumée de silice est encore privilégiée. Cette tendance entraîne encore des exploitations excessives des gisements non renouvelables. L'une des solutions adéquates est de substituer partiellement le ciment par des additions minérales de genres coproduits industriels ou abondants dans la nature, comme le filler calcaire, la pouzzolane naturelle et le laitier granulé.

La présente thèse s'intéresse à la valorisation des matériaux locaux et coproduits disponibles, provenant de différents gisements et ressources Algériens, dans la formulation de BAPHP. Il s'agit de l'incorporation de sable de carrière et de sable de dune en substituant partiellement ou totalement le sable de rivière, ainsi que l'incorporation de filler calcaire, de pouzzolane naturelle et de laitier granulé en remplaçant partiellement le ciment.

Ce travail de recherche a pour objectif principal de développer une série de BAPHP à base de ces matériaux en évaluant expérimentalement leurs effets sur les paramètres de la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité), ainsi que les résistances mécaniques (résistances à la compression à 7, 28 et 90 jours et résistance à la traction à 28 jours) de BAPHP.

La présente thèse est organisée en six chapitres et divisée en deux parties :

- La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique approfondie et critique sur l'état de l'art relatif aux BAP et BAPHP. Elle contient trois chapitres :
 - Le chapitre 1 : présente le concept de BAPHP en tant que nouveau matériau, décrit les essais de sa caractérisation à l'état frais et fait un survol sur ses résistances mécaniques à l'état durci.
 - Le chapitre 2 : expose une revue sur les différentes méthodes proposées dans la littérature pour formuler le BAP et au même temps le BAPHP.
 - Le chapitre 3 : fait le point sur un certain nombre de connaissances concernant l'influence de différents types de sables et d'additions minérales, utilisés dans ce travail, sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de BAP et BAPHP.
- La deuxième partie est consacrée à notre étude expérimentale. Elle contient trois chapitres :
 - Le chapitre 4 : décrit les matériaux utilisés, la démarche expérimentale et les essais effectués.
 - Le chapitre 5 : présente les résultats obtenus et leurs discussions concernant l'effet de l'incorporation de différents types de sables sur les propriétés de BAPHP.
 - Le chapitre 6 : présente les résultats obtenus et leurs discussions concernant l'effet de l'incorporation de différents types d'additions minérales sur les propriétés de BAPHP.

La conclusion générale propose enfin une synthèse des résultats obtenus dans cette thèse.

CHAPITRE 1 :

CONCEPT ET CARACTÉRISATION DE BAPHP

1.1 Introduction

Les spécialistes du béton utilisent des termes comme béton autoplaçant BAP ou béton à hautes performances BHP pour désigner différents types de bétons. Ces termes signifient ce qui peut être attendu comme caractéristiques que ce soit à l'état frais ou durci. Dans le BAP, ce qui importe, c'est d'avoir une très grande fluidité qui assure une auto mise en place sans aucun apport d'énergie. Dans le BHP, ces hautes performances font souvent référence à des résistances mécaniques très élevées et d'une durabilité plus longue. Ces dernières années, avec l'avènement du béton autoplaçant à hautes performances BAPHP, c'est maintenant l'ensemble des hautes propriétés rhéologiques et mécaniques à la fois qui attire l'attention comme béton innovant.

Le BAPHP est une nouvelle génération du béton qui a franchi une étape très importante dans le monde de construction par son ultra maniabilité et ses propriétés mécaniques extraordinaires. Agit comme une pierre liquide, le BAPHP peut remplir parfaitement les coffrages complexes et très encombrés, sous son poids propre seulement et sans aucun apport d'énergie, tout en générant un produit final homogène et très résistant.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives au BAPHP en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord le concept de BAPHP en mettant en relief son cahier de charges et sa spécificité de structure. Il fait ensuite un recensement et une description critique sur les différents essais utilisés en pratique pour la caractérisation empirique de la maniabilité du BAPHP. Ainsi, son comportement rhéologique à l'état frais est défini. Enfin, un aperçu détaillé est exposé sur ses propriétés mécaniques à l'état durci.

1.2 Concept de BAPHP

1.2.1 Cahier de charges

Le BAPHP est défini conventionnellement comme un béton extrêmement fluide qui est mis en œuvre dans n'importe quel coffrage sous le seul effet de la gravité sans aucun mode de compactage extérieur, tout en restant homogène et tout en possédant, à l'état durci, une résistance à la compression supérieure à la classe C50/60 et une durabilité accrue.

Le BAPHP se distingue des bétons dits ordinaires BO, par son comportement rhéologique à l'état frais et ses propriétés mécaniques à l'état durci. Sa mise en place se fait par le simple versement sous son poids propre seulement, sans aucune énergie de serrage ou compactage (ni vibration, ni piquage, ni compression). Ce béton spécial, qualifié à haute maniabilité et hautes résistances mécaniques (ou à hautes performances rhéologiques et mécaniques), doit avoir le cahier des charges suivant ;

- Un BAPHP doit être d'abord très fluide pour s'écouler avec un débit suffisant en milieu infini libre (une dalle par exemple). Ceci se traduit dans la pratique par un étalement important et une grande vitesse d'écoulement.
- Un BAPHP doit être également très déformable pour se faufiler sans peine à travers des zones confinées (coffrage très ferrailé ou étroit). Ceci se traduit dans la pratique par une capacité de remplissage très élevée caractérisant par une bonne résistance à la ségrégation dynamique lors de l'écoulement. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les graviers cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si le mortier n'est pas assez résistant au cisaillement (Fig. 1.1). Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines et interrompre l'écoulement [*Sedran*].
- Un BAPHP doit être aussi stable pour rester homogène une fois mis en place. Il doit avoir donc une bonne résistance à la ségrégation statique en état au repos. De façon corollaire, il ne doit pas subir un ressuage trop fort car ceci peut diminuer l'adhérence des armatures en parties hautes du béton, ainsi que l'apparition de fissures.

- Un BAPHP doit finalement avoir, à l'état durci, une résistance à la compression au moins égale à celle de BHP, qui doit être supérieure à la classe C50/60 MPa [NF EN 206]. Ces hautes résistances pourraient assurer une durabilité exceptionnelle.

En conclusion, la principale difficulté de fabriquer le BAPHP est qu'il doit concilier des propriétés *a priori* contradictoires ; d'une part, une grande fluidité et une grande déformabilité et, d'autre part, une stabilité suffisante et une haute résistance en compression ; afin d'obtenir finalement un béton de hautes performances rhéologiques et mécaniques.

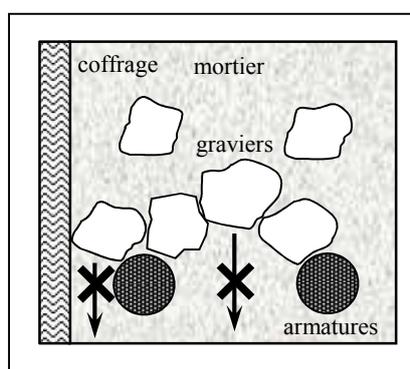


Figure 1.1 : Blocage des graviers au droit des obstacles lors de coulage du béton

1.2.2 Structure

Le cahier des charges exigeant de BAPHP est satisfait par une conception de formule particulière. En effet, le BAPHP doit renfermer un volume important de pâte de liant au détriment des graviers dont le diamètre maximal doit être relativement petit. Il est nécessaire également que le liant, qui sert à substituer les graviers, contient un fort dosage en ciment et une teneur importante en addition minérale. Or, le BAPHP possède un volume de sable assez proche de celui de BO. En plus, il est certain que le rapport Eau/Liant est faible dans le BAPHP, ce qui rend l'ajout d'un dosage relativement important en superplastifiant indispensable. Parfois, l'utilisation de l'agent de viscosité et/ou la fumée de silice peut être nécessaire pour stabiliser la formule. Les dosages exacts des constituants dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. Une comparaison des structures de formulation de BAPHP et BO est représentée à la Fig. 1.2. De manière plus approfondie, la structure de BAPHP se caractérise par dix particularités dont le détail est décrit ci-dessous.

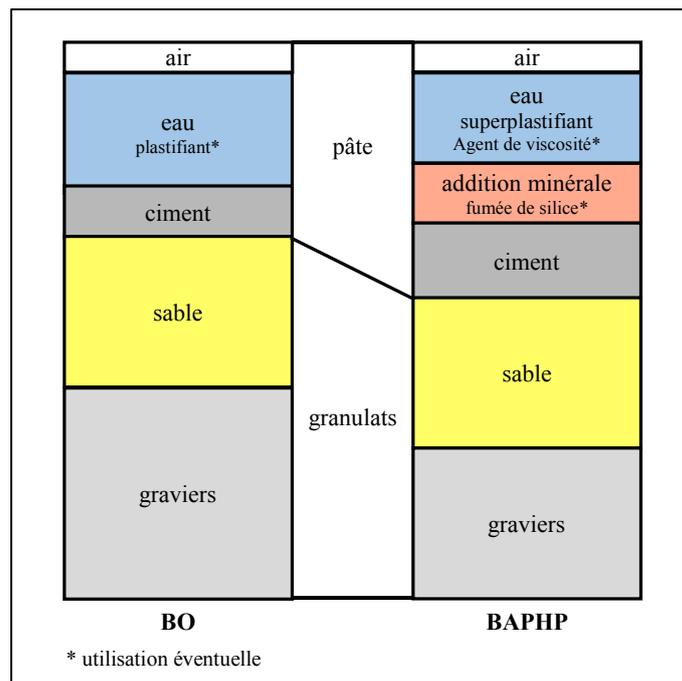


Figure 1.2 : Comparaison des structures de BAPHP et BO

A. Un faible volume de graviers :

Les graviers sont le facteur le plus important qui provoque le blocage de l'écoulement en milieu confiné. En plus, leur présence augmente le risque de la ségrégation, ainsi que le frottement entre leurs grains limite l'écoulement en milieu libre. C'est pourquoi, il faut prendre un volume faible des graviers dans le BAPHP. Par contre, la présence de graviers permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire dans le béton, et par conséquent limiter la quantité de pâte de liant nécessaire pour obtenir la maniabilité et la résistance souhaitées [de Larrard & Belloc]. En général, ces considérations conduisent à adopter dans le BAPHP un volume réduit de graviers de l'ordre de 28% à 35% [EFNARC] [EPG] ou un rapport massique Graviers /Sable de l'ordre de 1 [AFGC]. Bien évidemment, ces grandeurs peuvent être revues à la hausse si le confinement est faible (dans un coffrage peu ferrailé par exemple) ou à la baisse dans le cas contraire.

B. Un diamètre maximal relativement petit de graviers :

Le risque de blocage dans un milieu confiné augmente proportionnellement avec le grossissement de diamètre maximal D des graviers. La limitation de dimensions des graviers est aussi importante que leur volume dans le BAPHP destiné aux éléments à intervalle d'écoulement faible. En général, ce diamètre est compris entre 10 et 20 mm dans le BAPHP [AFGC].

C. Un volume élevé de pâte :

La pâte a pour rôle de séparer les graviers en limitant les frottements entre eux, ainsi d'empêcher la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. C'est pourquoi, le BAPHP doit contenir un volume important de pâte, typiquement de 330 à 400 litres/m³ [AFGC] ou un rapport volumique sable/pâte de l'ordre de 0.60 à 0.80 [Khayat & Manai].

D. Une quantité importante des fines :

Une quantité importante des fines, constituant le liant et les granulats qui ne dépassent pas 80 µm, est privilégiée au détriment des graviers afin de rendre la pâte plus épaisse et garantir donc le compromis entre fluidité et stabilité. Le dosage en fines est de l'ordre de 450 à 600 kg/m³ dans le BAPHP [EFNARC] [AFGC].

E. Un fort dosage en ciment :

Il est évident qu'un fort dosage en ciment amène à des hautes résistances mécaniques, c'est pourquoi le BAPHP requiert normalement un dosage en ciment nettement supérieur à celui de BO (généralement plus de 380 kg/m³). En principe, tous les types normalisés du ciment de classes 52.5 et 42.5 conviennent pour la fabrication de BAPHP. La classe 52.5 donne facilement les hautes résistances mécaniques mais la classe 42.5 est plus économique. Par ailleurs, l'utilisation de type ciment Portland CEM I est privilégié car il offre toute latitude pour varier et contrôler les quantités à incorporer des additions minérales.

F. Une teneur importante en addition minérale :

L'ajout d'une quantité importante d'au moins d'une addition minérale dans le BAPHP est indispensable afin d'augmenter la teneur en liant et de régler le dosage en ciment. Ces additions peuvent réduire le risque de fissuration thermique provoquée par la chaleur d'hydratation, abaisser le coût global par rapport au ciment, et parfois. Elles permettent également d'améliorer la distribution granulaire, la maniabilité et certaines propriétés mécaniques à long terme. Le liant est souvent un composé binaire ou ternaire, voire plus ; ciment Portland avec traditionnellement filler calcaire ou autres additions minérales, comme laitier de haut fourneau, cendre volante ou pouzzolane naturelle. Les types des additions minérales et leur dosage sont choisis selon les critères des résistances

mécaniques ciblées et de la durabilité souhaitée. La quantité de l'addition minérale à incorporer dans le BAPHP peut atteindre 60 % de la masse de liant [*Dinakar & al.*].

G. Un faible rapport massique Eau/Liant :

Certes que le BAPHP possède un faible rapport (Eau efficace/Liant équivalent), d'ordre inférieur de 0.4, afin de lui offrir des hautes résistances mécaniques. Par contre, avec toute limitation de la quantité d'eau, il faut prévoir une diminution considérable de l'écoulement de BAPHP que ce soit dans les milieux libres ou confinés.

H. Un fort dosage en superplastifiant :

L'introduction de dosage important en superplastifiant dans le BAPHP est indispensable, ceci permet de garder une faible teneur en eau tout en conservant la grande maniabilité. Toutefois, tout dosage en superplastifiant trop élevé, proche ou supérieur au dosage de saturation, pourrait augmenter la sensibilité du béton vis-à-vis des problèmes de ségrégation et ressuage [*de Larrard & al.*²]. Il pourrait également retarder le temps de prise et puis le temps de démoulage. Dans la formulation de BAPHP, l'optimisation du dosage en superplastifiant doit toujours viser [*Felekoglu*].

I. Une utilisation éventuelle de l'agent de viscosité :

Bien que ce ne soit pas systématique, le BAPHP contient parfois un agent de viscosité [*Sedran*]. De façon schématique, son utilisation semble se justifier dans le cas des BAP ayant des rapports E/L élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Pour le BAPHP ayant des faibles rapports E/L, son utilité est à étudier au cas par cas. En revanche, l'utilisation de ce produit est au contraire peu répandue, car il engendre un surcoût, qui s'ajoute à ceux dus au superplastifiant et aux additions minérales.

J. Un ajout éventuel de la fumée de silice :

L'incorporation éventuelle de la fumée de silice est justifiée par une augmentation supplémentaire des résistances mécaniques de BAPHP ayant de très faibles rapports Eau/Ciment. Cependant, cette utilisation est trop chère, et nécessite en plus une autre quantité supplémentaire de SP capable de disperser les particules ultrafines de la fumée de silice.

1.3 Caractérisation à l'état frais

À l'état frais, le comportement et la cratérisation des BAPHP et BAP sont identiques. C'est pourquoi, on utilise le terme de BAP quand le BAPHP est encore frais. Par ailleurs, dans littérature concernant le BAP, les paramètres empiriques de la maniabilité ne sont pas bien identifiés et parfois sont dépendants les uns des autres, et par conséquent, certains chevauchements sont inévitables. En effet, les chercheurs utilisent plusieurs grandeurs telles que ; la fluidité, la viscosité, la mobilité en milieu libre et confiné, la déformabilité, la capacité de remplissage et le passage, la stabilité, l'homogénéité, la résistance à la ségrégation statique et dynamique, etc.

Les paramètres de la maniabilité du BAP peuvent être identifiés et classés en trois grandeurs comme suit :

- **Fluidité** : La capacité du BAP à s'écouler et remplir les coffrages infinis avec une viscosité suffisante. C'est la mobilité et le passage en milieu libre (non confiné et sans obstacles).
- **Déformabilité** : La capacité du BAP à s'écouler à travers des obstacles et à remplir les coffrages très ferrailés sans ségrégation dynamique. C'est la mobilité et le passage en milieu confiné.
- **Stabilité** : La capacité du BAP à rester homogène après sa mise en œuvre. C'est la résistance à la ségrégation statique en état de repos.

Pratiquement, les laboratoires ne cessent de développer leurs propres essais qui permettent d'évaluer et vérifier la maniabilité du BAP. Cependant, les formulateurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à caractériser cette maniabilité, car il existe dans la littérature un grand nombre d'essais normalisés et non normalisés qui compliquent grandement l'analyse des résultats.

La prochaine séquence présente et critique les essais les plus répondus et les plus utilisés pour mesurer la maniabilité du BAP selon les critères de la fluidité, la déformabilité et la stabilité. Il est à noter que le béton frais testé doit être mis dans les différents dispositifs d'essais sans aucun mode de serrage ou vibration.

1.3.1 Essais de fluidité

1.3.1.1 Étalement au cône d'Abrams

Cet essai (*Slump-Flow*) utilise le cône d'Abrams pour évaluer l'étalement de BAP sur une plaque métallique carrée (Fig. 1.3). Il consiste à remplir le cône de 6 litres de béton puis le soulever. Au bout d'une minute, l'étalement SF est mesuré par la moyenne de deux diamètres orthogonaux de la galette obtenue. Selon la norme [NF EN 12350-8], le BAP doit atteindre un étalement $SF \geq 550$ mm.

Par ailleurs, il est possible de mesurer le temps T_{500} pour atteindre un étalement de 500 mm, ce qui donne la vitesse d'écoulement et par conséquent indique la viscosité apparente. La norme [NF EN 12350-8] classe le BAP en deux viscosités apparentes selon le temps T_{500} : $VS1$ ($T_{500} < 2$ sec) et $VS2$ ($T_{500} \geq 2$ sec).

Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Par exemple, avec un béton peu stable, on remarque une laitance de pâte au bord de la galette ou un amas des graviers au centre. Cependant cette observation est difficilement quantifiable. Cet essai est très facile à réaliser et ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. En revanche, il ne met pas en relief l'importance du caractère hétérogène du BAP [Sedran].

1.3.1.2 Écoulement à l'entonnoir en V

Cet essai (*V-Funnel*) détermine le temps d'écoulement de BAP à travers l'orifice d'un entonnoir en forme V, ce qui indique sa viscosité (Fig. 1.4). Il consiste d'abord à verser 10 litre de béton dans l'entonnoir, puis libérer l'orifice et démarrer le chronomètre au même temps. L'évacuation du béton se déclenche sous son poids propre et le temps d'écoulement Tv , nécessaire pour vider l'entonnoir, est mesuré. Selon la norme [NF EN 12350-9], le BAP doit s'écouler dans un temps $Tv \leq 25$ sec.

Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, il peut donner des indications sur la capacité de remplissage et la ségrégation dynamique. En effet, si le BAP contient trop des graviers, un blocage partiel de l'écoulement pourrait être engendré. L'entonnoir ici confine le béton en deux dimensions ce qui simule un coffrage très étroit. En plus, un temps élevé d'écoulement signifie une viscosité élevée due au frottement intergranulaire.

La difficulté principale de cet essai est comment mesurer correctement le temps d'écoulement du béton. Le chronomètre est activé précisément dès que le clapet est ouvert, mais le temps d'arrêt est plus difficile à déterminer puisque les bétons testés n'ont pas tous la même viscosité. Certains bétons très fluides (peu visqueux) passent à travers l'entonnoir sans laisser de dépôts derrière eux, cependant, les bétons plus visqueux n'ont pas une fin d'écoulement si démarquée ce qui prête à interprétation entre différents manipulateurs [Khayat & al.¹].

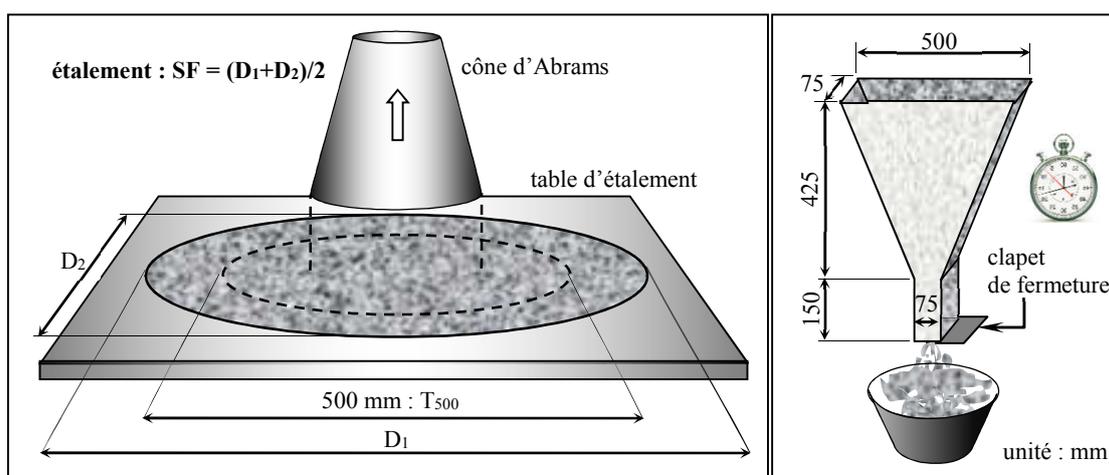


Figure 1.3 : Essai de l'étalement au cône d'Abrams

Figure 1.4 : Essai de l'entonnoir en V

1.3.1.3 Boîte de LCPC

Cet essai (*LCPC-Box*) a été développé par [Roussel] afin de faciliter l'évaluation de fluidité de BAP. Il consiste à verser un seau contenant 6 litres de béton dans une boîte de forme parallélépipède et mesurer la longueur de l'écoulement après son arrêt (Fig. 1.5). Cet écoulement unidimensionnel fournit les mêmes informations que celles de l'étalement au cône d'Abrams. Cependant, il est considéré homogène puisque son épaisseur à l'arrêt peut atteindre 6 cm. Par contre, dans l'essai de l'étalement au cône d'Abrams, l'épaisseur finale de la galette est du même ordre de grandeur que le diamètre maximal des graviers, ce qui empêche par la suite toute corrélation analytique entre les paramètres rhéologique et l'étalement [Roussel & Coussot].

1.3.1.4 Orimet

L'essai l'*Orimet* a été développé par [Bartos] pour évaluer rapidement la viscosité des bétons fluides sur chantier, puis il a été adapté pour le BAP [EFNARC]. Il est très similaire

à l'essai de l'entonnoir en V. Il s'agit d'un tube cylindrique rigide de hauteur 60 cm et \varnothing 10 cm mené à la base d'un orifice de forme conique inversé de hauteur 6 cm et \varnothing à l'extrémité de 8 cm (Fig. 1.6). Il consiste à remplir l'Orimet de 10 litres de béton, puis à ouvrir la trappe et à mesurer le temps d'écoulement T_o nécessaire pour vider le tube. La vidange totale est considérée lorsque la lumière est apparue dans l'orifice par vue en-dessus. Pour obtenir un BAP, le temps d'écoulement doit être $T_o \leq 5 \text{ sec}$ [EFNARC]. Cet essai est simple, rapide et très pratique au chantier mais n'est pas précis concernant la mesure de temps. Le débit prolongé peut signaler un blocage ou une ségrégation de béton lors de sa mise en place.

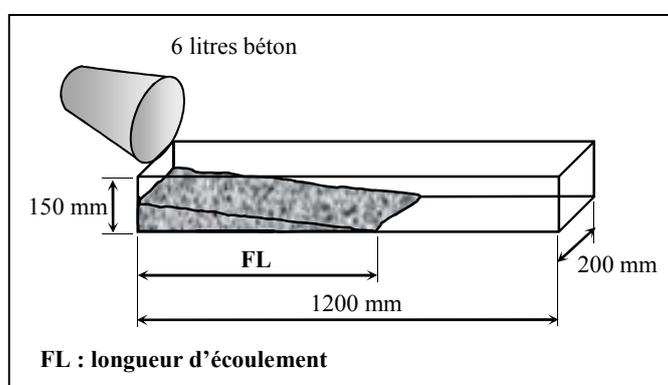


Figure 1.5 : Essai de la boîte LCPC

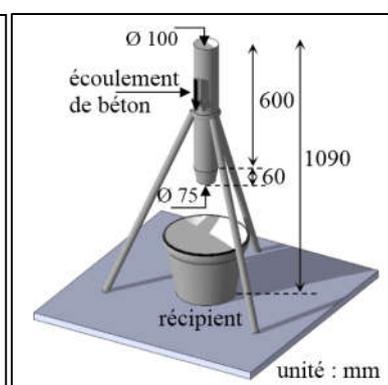


Figure 1.6 : Essai de l'Orimet

1.3.2 Essais de déformabilité

1.3.2.1 Boîte en L

L'essai de la boîte en forme L (*L-Box*) détermine la capacité de remplissage du BAP en milieu confiné (Fig. 1.7). Son principe est de remplir la partie verticale de la boîte en 12 litres de béton, ensuite de lever la trappe en permettant l'écoulement du béton dans la partie horizontale à travers deux ou trois barres d'armatures de \varnothing 14 mm, selon le confinement choisi. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs finales de béton aux extrémités (H_1 à l'extrémité de la partie verticale et H_2 à celle de la partie horizontale) et on exprime le résultat par un taux de remplissage $PL = H_1/H_2$. La norme [NF EN 12350-10] qualifie le BAP lorsque $PL \geq 0.80$.

Cet essai permet également de vérifier que la mise en place de BAP ne sera pas contrariée par des blocages de graviers en amont des armatures et des ségrégations de constituants en aval. Cependant, cette vérification n'est pas quantifiable.

1.3.2.2 Écoulement à l'anneau

Cet essai (*J-Ring*) estime l'aptitude à l'écoulement du BAP en milieu confiné par la mesure de palier de blocage de l'étalement. Il est analogue à l'essai de l'étalement au cône d'Abrams mais le béton s'écoule à travers une grille d'armatures verticales soudées dans un anneau centré à la plaque (Fig. 1.8). Il existe deux variantes de cet essai (confinement étroit et autre large). L'anneau, de \varnothing 300 mm, contient 16 ou 12 barres de \varnothing 18 mm, de hauteur 140 mm et espacées régulièrement de 59 ou 79 mm d'environ. Au bout d'une minute de l'étalement, on estime le palier de blocage de l'étalement PJ par la différence de hauteur entre le béton juste à l'extérieur et au centre de l'anneau. La hauteur juste à l'extérieur de l'anneau est calculée par la moyenne des hauteurs dans quatre points font deux diamètres orthogonaux. La norme [NF EN 12350-12] qualifie un BAP lorsque $PJ \leq 10$ mm.

Dans cet essai, il est possible également de mesurer les étalements SF_j de la galette obtenue et le temps T_{j500} pour atteindre un étalement de 500 mm, ce qui permet d'évaluer à la fois la fluidité et la viscosité. La différence entre les étalements obtenus ne doit pas dépasser 50 mm pour obtenir un BAP [EFNARC].

D'après l'[EFNARC], il serait plus intéressant de combiner conjointement l'essai de l'anneau avec l'Orimet ou l'entonnoir en V afin de récolter plusieurs informations à la fois. Cependant, on ne sait pas encore comment interpréter les résultats de ces essais combinés [Bethmont].

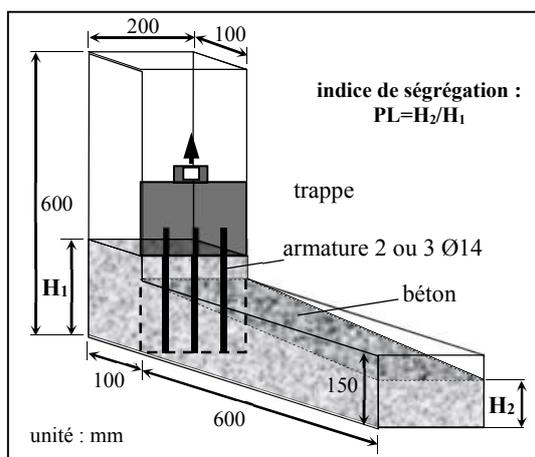


Figure 1.7 : Essai de la boîte en L

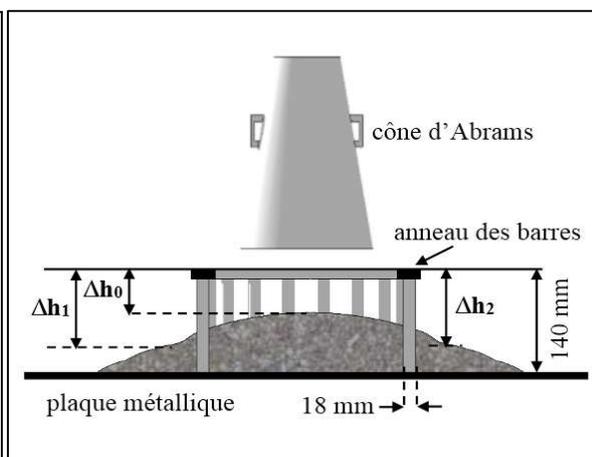


Figure 1.8 : Essai de l'étalement à l'anneau

1.3.2.3 Boite en U

Cet essai (*U-box*) a été développé afin de mesurer la capacité de remplissage de BAP dans un coffrage très confiné et fortement ferrailé [Haykawa]. La boîte en forme U est divisée en deux compartiments identiques par une cloison centrale dont le fond est doté d'une trappe coulissante qui peut libérer une grille d'armatures (3 barres de Ø13 mm, hauteur 140 mm et espacement nu 35 mm). Le principe de cet essai est de remplir le premier compartiment de 16 litre de béton puis d'ouvrir la trappe coulissante en permettant l'écoulement du béton à travers la grille d'armatures vers le deuxième compartiment. À la fin, la hauteur de remplissage H_U de béton dans le second compartiment est mesurée. Pour obtenir un BAP, il doit être : $H_U > 30$ cm (Fig. 1.9).

Il peut vérifier également la mise en place de BAP vis-à-vis des blocages inacceptables. Cependant, la vérification n'est pas quantifiable. Il est à noter qu'il existe d'autre version de cet essai où la boîte ayant un fond aplati.

L'essai fournit une bonne évaluation de la capacité de remplissage de BAP destinés aux ouvrages ayant des éléments élancés fortement ferrailés puisque les dimensions de la boîte et l'espacement des armatures sont considérés trop petits. La question reste ouverte si la hauteur de remplissage ($H_U \leq 30$ cm) pour le BAP destiné aux ouvrages normaux sera encore acceptable ou non [EFNARC].

1.3.2.4 Caisson de Kajima

Cet essai (*Fill-Box*), connu aussi par le nom de son auteur *Kajima*, mesure la capacité de remplissage de BAP dans un coffrage très ferrailé. Le caisson transparent se compose de deux parties sans séparation. La première est libre de tous obstacles et équipée au sommet par une buse de remplissage, de Ø100 mm et hauteur 500 mm. La deuxième contient 35 obstacles latéraux en tuyaux PVC de Ø 20 mm et d'espacement 50 mm (Fig. 1.10).

L'essai consiste à verser, à débit constant, 35 litres de béton dans la première partie jusqu'à une hauteur de 220 mm. Le béton s'écoule bien sûr vers la deuxième partie en traversant les tuyaux. Après le repos, les hauteurs moyennes H_1 et H_2 de béton aux parois latérales (parties 1 et 2) sont mesurées et le ratio de remplissage est exprimé par : $PR = ((H_1 + H_2)/2H_2)100\%$. L'auteur estime qu'un béton sera autoplaçant si $PR > 60\%$.

Dans les faits, la hauteur de 220 mm varie plutôt entre 200 et 240 mm selon la viscosité du béton. Certains bétons s'immobilisent rapidement après avoir transvidé tandis que d'autres s'affaissent tranquillement sous leur propre poids. Le ratio de remplissage n'est plus donc calculé en fonction d'une valeur fixe de 220 mm, mais bien à partir de la hauteur réelle du béton après son immobilisation.

Cet essai est difficile à effectuer sur place à cause de la structure complexe de l'appareil et du volume très important du béton. Cependant, il donne une bonne caractérisation de la capacité de remplissage de BAP [EFNARC].

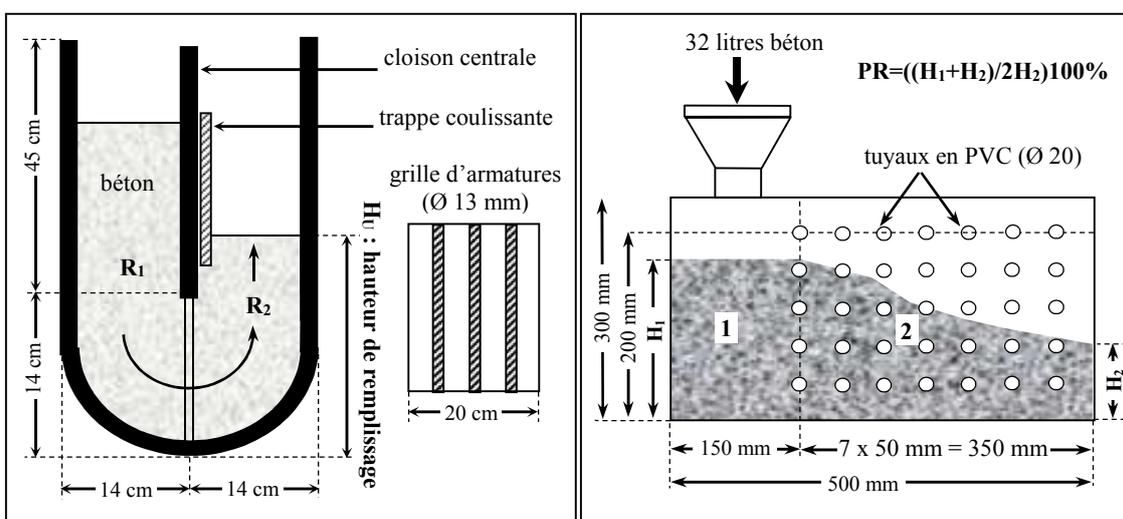


Figure 1.9 : Essai de la boîte en U

Figure 1.10 : Essai du caisson de remplissage

1.3.3 Essais de stabilité

Il est indispensable de caractériser la résistance à la ségrégation statique du BAP au repos car sa grande fluidité peut conduire à une mauvaise suspension des granulats. Toutefois, il est inutile de mesurer le ressuage puisque le volume important des fines dans le BAP réduit considérablement la quantité d'eau remontante à la surface. La majorité de laboratoires de recherche se penchent vers le développement de types essais caractérisant le paramètre de la stabilité.

1.3.3.1 Stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis (*GTM screen stability*) estime la laitance de BAP au repos à travers un tamis (Fig. 1.11). Il consiste à déposer au repos 10 litres de béton dans un seau

fermé pendant 15 min. Ensuite, un échantillon de 4.80 kg, environ 2 litres, de la partie supérieure du béton est versé sur une hauteur de 50 cm dans un tamis de diamètre 30 cm, de mailles carrées de 5 mm et équipé par un fond récipient. Après deux minutes de tamisage, la quantité de laitance, qui a traversé le tamis, est pesée. Le pourcentage du poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime l'indice de ségrégation SR . Selon la norme [NF EN 12350-11], le BAP doit avoir un indice de ségrégation $SR \leq 20\%$.

L'expérience montre que cet essai est très efficace pour l'évaluation de la stabilité de BAP que ce soit au laboratoire ou au chantier [EFNARC]. Cependant, bien qu'il soit simple, l'essai n'est pas rapide, et nécessite une balance précise.

1.3.3.2 Ségrégation à la colonne

Cet essai (*Cylindrical mould for the washout*) a été développé par [Lowke & al.] afin d'estimer la tendance à la sédimentation des graviers dans le BAP. Le dispositif se compose d'une colonne cylindrique en métal ou en PVC de \varnothing 15 cm et de hauteur 45 cm, séparable en trois cylindres identiques, de hauteur 15 cm, facilitant l'extraction du béton. La colonne repose sur une plaque métallique et les cylindres sont bien serrés ensemble par des colliers ou d'autres moyens afin de maintenir leurs joints étanches (Fig. 1.12). Il peut être équipé par deux lames séparatrices coulissantes qui permettent le démontage de la colonne tout en préservant l'échantillon de béton dans les cylindres.

L'essai consiste à remplir la colonne d'environ 8 litres de béton. Après 30 minutes au repos, chaque cylindre est alors démoulé et son échantillon de béton est recueilli et pesé. Ensuite, les trois échantillons sont séparément lavés sur un tamis de mailles 5 mm afin de ne garder que les graviers, qui sont enfin bien séchés et puis pesés.

L'indice de ségrégation statique I_{ss} est exprimé par le pourcentage de variation des masses de graviers G dans les cylindres de base et de sommet ; $I_{ss} = (G_{inf} - G_{sup})100\%$. D'après [Bello], le BAP est obtenu lorsque $I_{ss} < 4\%$.

L'essai de la ségrégation à la colonne par lavage est fortement recommandé dans les pays anglo-saxons pour déterminer la stabilité de BAP dans les applications verticales (poteaux et voiles) et il est récemment normalisé [ASTM C1610/C1610M-17]. Dans la pratique, il existe une grande variété de colonnes qui se différencient par les dimensions, la forme et

le nombre de cylindres. Par exemple, [Assaad & al.] ont proposé un tube plus grand, séparable en quatre cylindres et nécessite 22 litres environ de béton, afin de bien représenter l'échantillon de BAP.

D'après les auteurs, le temps nécessaire pour réaliser cet essai est de l'ordre d'une heure, ce qui est estimé trop long. En plus, l'essai nécessite des équipements assez spécifiques comme le tamis et la balance, ce qui rend son utilisation difficile sur chantier. Par ailleurs, [Mouret & al.] ont indiqué que l'essai à la colonne, sous réserve d'une exploitation correcte des résultats, s'avère être un outil d'optimisation et de contrôle fiable. Par contre, [Assaad & al.] ont constaté qu'il est affecté par de différents facteurs et ne devrait être utilisé que comme test complémentaire.

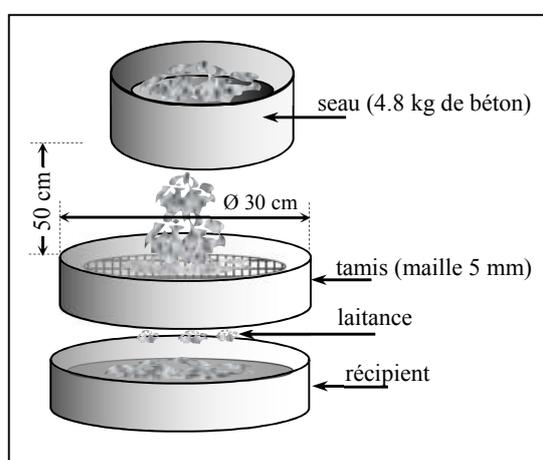


Figure 1.11 : Essai de la stabilité au tamis

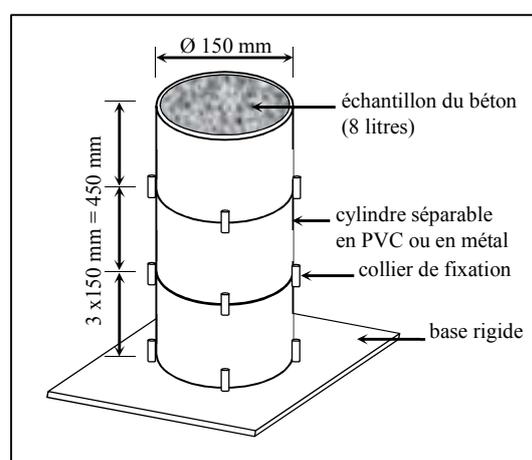


Figure 1.12 : Essai de la ségrégation à la colonne

1.3.3.3 Pénétration au cylindre

Cet essai, proposé par [Bui Van & al.], détermine la résistance à la ségrégation en mesurant la pénétration d'un cylindre au béton. Il s'agit d'un cylindre plein composé d'une tête rigide en métal ou en plastique de poids 54 grammes, de hauteur 50 mm et de \varnothing 75 mm (Fig. 1.13). L'essai consiste à placer un échantillon de béton dans un récipient de taille suffisante pour que les effets des parois puissent être négligés, à bien niveler sa surface supérieure et à lisser au repos pendant 2 min. Puis, le cylindre est posé sur cette surface et laissé pénétrer librement dans le béton. Au bout de 45 sec, la profondeur de pénétration PP est mesurée par la moyenne des valeurs de trois points diamétralement opposés. Selon les auteurs, le béton est qualifié autoplaçant vis-à-vis au risque de ségrégation lorsque : $PP \leq 8$ mm.

Cet essai est très simple et le résultat est spontané. De plus, l'appareillage est peu cher et peu encombrant. Mais la surface d'essai doit être parfaitement plane [Bethmont]. Par ailleurs, il n'y a pas de données ni sur le volume nécessaire de l'échantillon de béton ni sur les dimensions de récipient. Autres essais similaires ont été proposés par plusieurs chercheurs. Par exemple, [Shen & al.] ont utilisé une sonde de pénétration composée d'un anneau de $\varnothing 12.7$ cm.

1.3.3.4 Tassement de surface

Cet essai mesure le tassement d'un disque sur la surface de béton, qui peut indiquer sa résistance à la ségrégation statique. Ses appareillages se composent d'un tube cylindrique verticale en PVC de hauteur 800 mm et de $\varnothing 200$ mm fermé à sa base. De plus, un disque acrylique, d'épaisseur 4 mm et $\varnothing 150$ mm, équipé de 3 ou 4 vis de longueur 75 mm assurant son ancrage dans le béton et une jauge à cadran ou un capteur digital pour mesurer l'évolution de tassement en fonction de temps (Fig. 1.14). L'essai consiste à verser 22 litre de béton dans le tube jusqu'à une hauteur de 700 mm. Puis, le disque est posé à la surface nivelée de béton. Le tube doit être couvert durant tout l'essai pour éviter l'évaporation. La première lecture de tassement est effectuée à la première minute, suivie des lectures toutes les 15 minutes pendant 3 heures et toutes les 30 minutes par la suite. Le tassement total H_s est exprimé en pourcentage par rapport à la hauteur initiale de béton. Le BAP stable doit posséder un $H_s < 0.50\%$ [Koehler & Fowler].

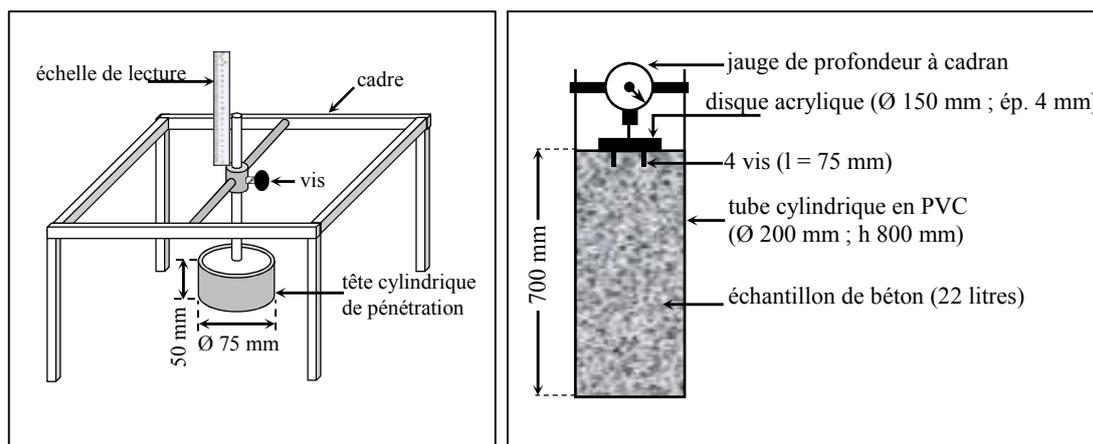


Figure 1.13 : Essai de la pénétration au cylindre Figure 1.14 : Essai du tassement de surface

1.3.4 Autres essais

Il reste à rappeler d'autres essais qui sont moins fréquemment utilisés ;

- Essai de la passoire : Il consiste à verser un échantillon de 30 litres de béton dans un récipient ayant un fond constitué d'un treillis soudé de mailles 5 cm et d'une trappe amovible. La mesure du volume passant à travers la grille, après ouverture de la trappe, indique la capacité de remplissage de BAP.
- Essai de la boîte balancée [*Esmailkhanian & al.*] : Il apprécie la ségrégation dynamique de BAP dans un milieu libre. Il consiste de 16 litres de béton dans une boîte parallélépipède basculée dans un côté pendant 60 cycles. Un pénétromètre de 104 g est installé à la surface du béton et ses profondeurs d'enfoncement initiale et finale (avant et après le mouvement) sont mesurées. La différence entre ces profondeurs estime l'indice de ségrégation dynamique. Les auteurs considèrent que la perte de l'écoulement, à distance supérieure à 3 m, est due principalement à la ségrégation de BAP lors de mouvement.
- Essai de la bille : Il est développé par [*Trudel*] et repris par [*Sedran*] afin d'apprécier la stabilité de BAP. Il consiste à mesurer l'enfoncement d'une bille, simulant des graviers de diamètre 20 mm, dans une éprouvette cylindrique (\varnothing 16 cm ; H 32 cm) du béton. La densité de la bille peut être ajustée par un contrepoids et l'enfoncement de la bille est mesuré par ordinateur.
- Essai du réseau de billes [*Bethmont*] : Il donne un modèle de mécanisme de ségrégation statique de BAP par un réseau de billes simulant un groupe des granulats immergé dans une matrice cimentaire. Il permet également d'intégrer l'influence des interactions entre les grains et la pâte.
- Essai de la palette [*Tangtermsirikul & al.*] : Il qualifie l'aptitude de mortier à résister au cisaillement d'une palette métallique simulant les graviers. Il mesure l'effort nécessaire pour extraire la palette d'un échantillon de mortier aux différentes vitesses.
- Essais sur béton durci : Plusieurs chercheurs ont effectué des essais sur béton durci de différentes dimensions et formes afin d'apprécier la distribution des graviers. L'auscultation sonique est utilisée pour mesurer la vitesse ultrasonique en différentes hauteurs de l'échantillon qui peut être une éprouvette simple ou même un poteau ou

un mur. Cette vitesse dépend bien sûr au nombre des grains de graviers. Le comptage de graviers est vérifié également sur des éprouvettes sciées ou carottées dans différentes hauteurs, soit à vue d'œil, soit à l'aide d'un logiciel de traitement d'image. Cependant, tous ces essais s'avèrent assez lourds et prennent beaucoup de temps, et donnent des résultats différés.

1.3.5 Discussion d'essais

Tous les essais, développés pour caractériser la maniabilité BAP, utilisent des dispositifs assez simples et peu coûteux comme ceux de BO. Ils permettent d'évaluer des grandeurs empiriques sans prendre en compte le caractère intrinsèque qui assure effectivement l'*autoplacement*. En plus, il n'existe pas, à l'heure actuelle, un essai généralisé qui peut déterminer simultanément les trois paramètres de la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité). Chaque essai permet de contrôler qu'un seul paramètre de la maniabilité. La combinaison d'au moins trois essais est nécessaire donc pour caractériser complètement la maniabilité de BAP.

Par ailleurs, le principal défaut de ces essais est de ne caractériser le comportement du BAP que pour un seul mode de sollicitation. En effet, ils le sollicitent de façon quasi-statique où la gravité intervient seul pour provoquer l'écoulement tandis que la mise en place de BAP se fait généralement par pompage. En plus, ces essais ne fournissent que des grandeurs dépendant de la géométrie des dispositifs. Ils permettent donc de comparer des bétons entre eux, mais ne sont pas extrapolables à des prédictions pour des structures réelles [*Sedran*].

1.4 Comportement rhéologique

1.4.1 Rhéomètre

Le rhéomètre à béton est généralement plus complexe que le rhéomètre traditionnel destiné aux corps liquides. Il est typiquement de dispositif à contrôle de vitesse et piloté automatiquement par un ordinateur. Son principe est de soumettre le béton aux différentes vitesses de rotation (taux de cisaillement $\dot{\gamma}$) et de mesurer les résultantes des couples de

cisaillement (contraintes de cisaillement τ). En fonction de ces grandeurs, la courbe d'écoulement obtenue, appelée également rhéogramme, est définie souvent par deux propriétés rhéologiques fondamentales ; la viscosité plastique μ et le seuil de cisaillement τ_0 . Des configurations géométriques typiques de rhéomètre à béton sont illustrées à la Fig. 1.15.

Par ailleurs, les mesures rhéologiques sont délicates à réaliser sur les bétons à cause de l'étendue des tailles des particules qui les composent (de 1 μm à 20 mm). En plus, les mesures dépendent du protocole de cisaillement, température, énergie de malaxage et dimensions. En effet, les différents rhéomètres à béton sont difficilement comparables entre eux car leurs modes de mesure et leurs géométries sont variables.

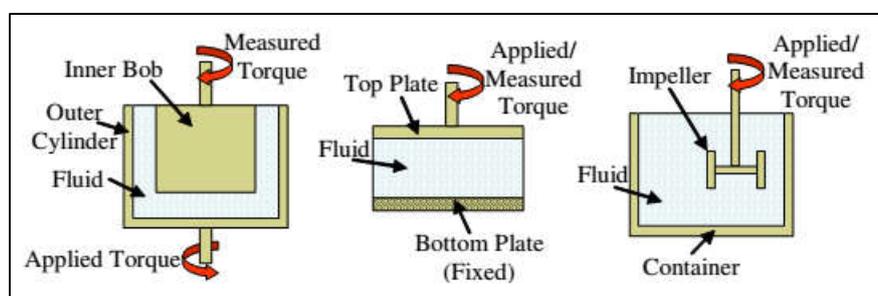


Figure 1.15 : Types de rhéomètres à béton [Koehler & Fowler]

1.4.2 Propriétés rhéologiques

Généralement, l'écoulement du béton, même extrêmement fluide comme le BAP, se comporte, comme un modèle viscoplastique de Bingham qui est donné par les équations suivantes ;

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} & \text{si } \tau > \tau_0 \end{cases}$$

Or, le BAP doit avoir un seuil de cisaillement très faible ($\tau_0 \leq 400 \text{ Pa}$) pour assurer un étalement ($SF > 600 \text{ mm}$) et une viscosité plus au moins élevée ($\mu > 200 \text{ Pa.s}$) pour éviter un écoulement trop lent [Sedran].

Néanmoins, les résultats de rhéomètre sur le BAP et le BHP montrent que la relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement n'est pas toujours linéaire (Fig. 1.16). Ainsi, lorsque l'écoulement de BAP est forcément calé sur le modèle de Bingham, le seuil de cisaillement extrapolé est toujours négatif [de Larrard & al.¹]. Pour cette

raison, [de Larrard & al.¹] préfèrent le modèle de Herschel-Bulkley, donné par l'équation suivante, pour décrire le comportement de BAP.

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n & \text{si } \tau > \tau_0 \end{cases}$$

Où ; k est un coefficient de consistance et n est un indice d'écoulement. En fonction de n , le modèle peut être ; rhéofluidifiant ($n < 1$), rhéoépaississant ($n > 1$) ou Binghamien ($n = 1$).

[de Larrard & al.¹] ont trouvé des valeurs pour le seuil de cisaillement τ_0 de 133, 269, 675 Pa, pour l'indice de viscosité k de 132, 269 et 792 Pa.s ^{n} et pour l'indice de l'écoulement n de 1.70, 1.73 et 1.88. Cependant, ce modèle montre dans la pratique des difficultés pour le calage de l'écoulement de BAP notamment lorsque le nombre des essais est limité. L'incertitude sur la valeur de chaque paramètre est plus importante dans le modèle de Herschel-Bulkley à trois points que celui de Bingham à deux points, qui reste le plus largement utilisé.

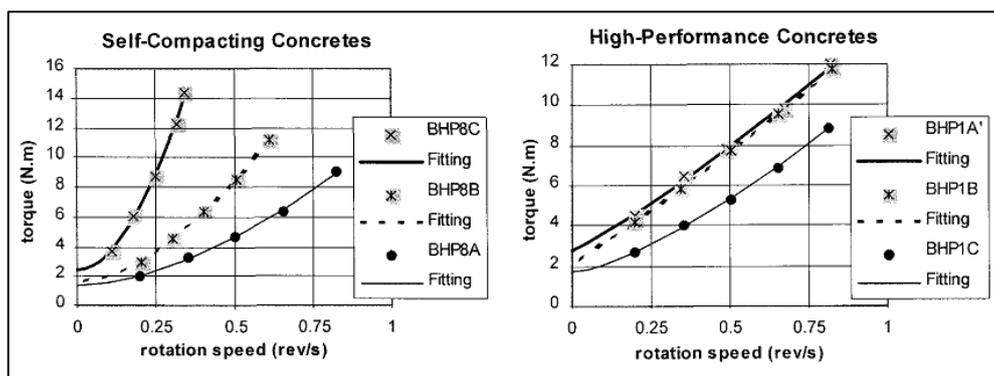


Figure 1.16 : Rhéogrammes de BAP et BHP [de Larrard & al.¹]

1.5 Propriétés mécaniques

1.5.1 Résistance à la compression

En général, le BAPHP peut présenter une gamme étendue de hautes résistances à la compression, de 50 à 130 MPa, en jouant sur le dosage et la nature du liant (ciment et additions) et le rapport E/L. Il faut, toutefois, s'attendre à des résistances au jeune âge modérées lorsque le BAPHP contient des teneurs élevées d'additions pouzzolaniques. En

plus, ces résistances au jeune âge peuvent être sensiblement diminuées à cause de l'utilisation combinée de l'agent de viscosité et du superplastifiant [Felekoglu & al.].

D'après [Desnerck & al.], qui ont étudié des données de 320 résultats de 41 publications, les résistances à la compression à 28 j sur des éprouvettes cylindriques sont supérieures à 90 MPa dans 43 résultats grâce à l'utilisation de ciment de classe 52.5 (Fig. 1.17).

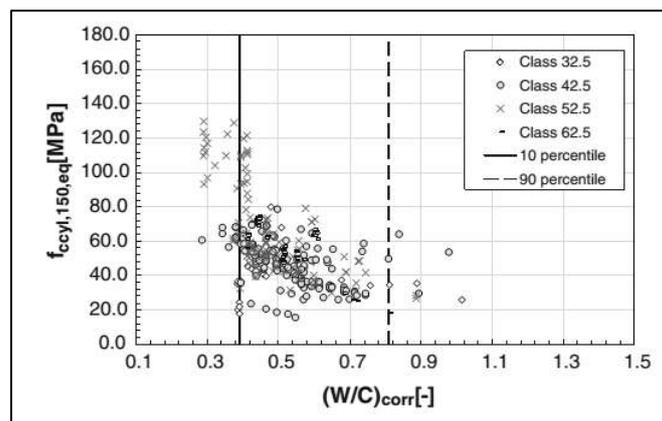


Figure 1.17 : Résistances à la compression à 28 j de BAP de 41 publications [Desnerck & al.]

1.5.2 Résistance à la traction

La composition particulière des BAP et BAPHP permet normalement d'anticiper une légère différence des rapports entre la résistance à la traction et celle à la compression par rapport aux BO et BHP. En revanche, [Turcry] démontre que, pour une même résistance à la compression, le BAP et le BO ont une même résistance à la traction. En assurant cet avis, [Desnerck & al.], à travers l'analyse 738 résultats de 77 études, affirment que les résultats entre 5% et 95% de BAP ont tendance à suivre la relation moyenne proposée par Eurocode 2 et CEB-FIP model code 2010 pour les trois types différents d'essais de la traction (directe, par fendage et par flexion) et notamment quand le BAP est formulé à la base de graviers calcaires concassés.

1.5.3 Déformabilités

En raison de la contribution considérable des granulats à la rigidité globale du béton, le BAPHP, contenant un faible volume de graviers et un grand volume de pâte, est susceptible d'être plus déformable que le BHP ayant la même résistance à la compression.

En effet, [Turcry] a trouvé que le module d'élasticité de BAP est systématiquement inférieur à celui de BO dérivé. Toutefois, la différence n'est pas très importante, puisqu'elle se situe entre 2 et 8%. Ce résultat a été confirmé par [Assié] pour des BAPHP et BHP formulés par différents rapports Granulat/Sable. En plus, [Domone²] a montré que les résultats sont très dispersés à cause de la variation de type et de teneur de granulats, mais la différence de module élastique est au moins inférieure à 5 % pour le BAPHP par rapport au BHP.

Par ailleurs, le BAPHP a toutes les caractéristiques pour que ses retraits soient très importants par rapport à ceux de BO. En effet, il contient un grand volume de pâte, un faible rapport Eau/Liant et fortement adjuvanté. Les études disponibles ont traité généralement les retraits de BAP et parfois à des hautes résistances. [Turcry] a trouvé que le retrait total des BAPHP, ayant des résistances à la compression élevées (67 et 71 MPa), est proche de celui de BO dérivé de résistance similaire (50 MPa). Mais même petite, la différence de retrait est toujours dans plus élevée pour les BAP. Cette différence est bien remarquée dans les résultats de [Assié] pour les BAPHP et BHP.

1.6 Conclusion

En se basant sur les concepts de BAP et de BHP, une nouvelle génération du béton s'impose dans le monde de construction, c'est le BAPHP. Ce chapitre est un résumé exhaustif qui a fait le point sur les connaissances relatives au BAPHP depuis sa création jusqu'à ce jour. Le concept de BAPHP vis-à-vis aux exigences de son cahier de charges est présenté. Les essais de sa maniabilité et ses propriétés rhéologiques et mécaniques sont discutés.

Ce chapitre nous a permis de dresser les conclusions suivantes :

- Le BAPHP doit harmoniser des propriétés contradictoires ; fluidité et déformabilité d'un côté, et stabilité et résistance mécanique de l'autre. Pour satisfaire ces exigences simultanément, sa formule doit comporter un squelette granulaire relativement fin et une quantité importante de pâte contenant un peu d'eau et adjuvantée par une forte dose de superplastifiant et parfois une autre dose d'agent de viscosité et/ou fumé de silice.

- Il n'existe pas à l'heure actuelle d'essai généralisé qui peut estimer simultanément les trois paramètres empiriques de la maniabilité de BAP-BAPHP (fluidité, déformabilité et stabilité).
- Bien que les essais caractérisant la maniabilité de BAP-BAPHP soient nombreux, il existe peu d'essais normalisés. Les Normes Européennes exigent trois essais pour estimer cette maniabilité ; fluidité (étalement au cône d'Abrams ou écoulement à l'entonnoir en V) ; déformabilité (boite en L ou écoulement à l'anneau) ; stabilité (stabilité au tamis).
- Le comportement rhéologique de BAPHP est donné généralement par le modèle de Bingham et parfois par le modèle de Herschel-Bulkley. Dans le modèle de Bingham, le BAPHP doit avoir un seuil de cisaillement très faible une viscosité plus au moins élevée.
- Grâce à sa formulation, le BAPHP possède généralement des résistances mécaniques comparables à celles de BHP, ceci dépend bien sûr de la teneur en eau et de la nature du liant. Le module élastique de BAPHP est légèrement faible par rapport à celui de BHP de même résistance à la compression. À l'opposé, le retrait total est susceptible d'être augmenté.

CHAPITRE 2 : REVUE DES MÉTHODES DE FORMULATION DES BAP-BAPHP

2.1 Introduction

Formuler un béton, c'est sélectionner et arranger les divers constituants disponibles en proportions optimales afin de satisfaire aux exigences de construction donnée. Dans le BO, les exigences sont généralement la résistance à la compression à 28 jours et l'affaissement au cône d'Abrams.

Le problème de la formulation des bétons spéciaux, comme les BAP, BHP, BAPHP, s'est vraiment compliqué dans les dernières années, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe de nouveaux matériaux tels que les additions minérales et les adjuvants chimiques, qui sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et du ciment. En effet, les méthodes universelles pour le BO, comme *Dreux-Gorisse*, *Bolomey*, *Faury*, etc., ne sont pas capables à formuler ces bétons spéciaux, car elles ne prennent en compte ni ces additions minérales ni ces adjuvants chimiques.

Comme une étape essentielle pour fabriquer et commercialiser un nouveau béton, il doit être formulé au moins par une méthode rationnelle reconnue. Depuis la création de BAP, les chercheurs ne cessent de lui proposer des solutions de formulation. En effet, il existe dans la littérature un nombre énorme de publications sur le développement des méthodes de formulation du BAP, qui sont basées sur une grande variété des principes et des paramètres de contrôle. Cependant, il n'y a aucune méthode standard pour n'importe quel BAP, la plupart sont des tentatives de formulation qui se basent sur l'expérience, les autres restent dans le stade théorique et peu sont vraiment perfectionnées et rationnelles. Il est important de noter que ces méthodes destinées au BAP sont largement valables à formuler le BAPHP.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique concernant les différentes méthodes de formulation de BAP-BAPHP, développées au monde depuis sa création jusqu'à nos jours. L'objectif est d'examiner ces méthodes et de fournir une base scientifique qui facilite le choix entre elles.

2.2 Pratique de la formulation de BAPHP

La mise au point de la formulation de BAPHP est complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au moins six, contre quatre dans le BO. En plus, le cahier des charges de BAPHP consiste au moins quatre clauses ; trois propriétés à l'état frais et une à l'état durci. Il faut assurer à la fois ; un grand étalement, une bonne capacité de remplissage, une résistance à la ségrégation accrue et une haute résistance à la compression.

Le cahier des charges du BAP est très souvent réduit aux trois clauses de l'état frais puisque les résistances à la compression ordinaire de 25 à 35 MPa sont facilement atteintes par le BAP. Par chance, les hautes résistances à la compression à 28 jours (C50/60) sont couramment atteintes par le BAP tout en réduisant le rapport (Eau/Ciment) et en augmentant le dosage en superplastifiant. En effet, la majorité des méthodes de BAP, quel que soit leur principe, peut le formuler pour des hautes résistances. C'est pourquoi les méthodes traditionnelles de formulation du BAP sont adoptées pour formuler le BAPHP.

Il existe dans la littérature des tentatives d'extraire du BAPHP à partir du BHP très fluide, mais elles ne sont pas promues à une méthode de formulation à proprement dite de composition. Elles sont considérées comme support qui facilite la formulation. À notre connaissance, il n'existe qu'une seule méthode destinée au BAPHP, au sens propre, qui est développée par les chercheurs [Le & al.] à l'Université de Bauhaus à Weimar en Allemagne. Cependant, cette formulation, exposée ci-après, est une combinaison de 3 méthodes existante de BAP.

2.3 Méthodes de formulation de BAP

Les formulateur de BAP considèrent souvent le volume comme paramètre principal à la composition à cause de la nécessité de remplir les vides entre les grains solides. En effet, les méthodes reposent généralement sur des approches empiriques qui privilégient l'optimisation des différentes phases du béton ; mortier, pâte ou empilement granulaire. Bien que les données sur la formulation de BAP soient énormes, il y a un manque de critères de concept cohérent permettant de traiter et comparer les méthodes. Sur la base de principe de conception, on va regrouper les méthodes de formulation de BAP sous 5

grandes approches : a) Approche basée sur l'optimisation du mortier ; b) Approche basée sur l'optimisation de la pâte ; c) Approche basée sur l'optimisation de l'empilement granulaire ; d) Approche basée sur l'optimisation de la résistance à la compression e) Approche basée sur le plan d'expérience.

Les méthodes seront identifiées selon leur paramètre clé de formulation et/ou leur origine de pays ou d'organisme. Les méthodes les plus importantes et les plus utilisées seront détaillées tout en exposant les étapes à suivre pour déterminer les dosages ou les volumes de constituants. Les autres méthodes seront présentées, avec les principes de base, par ordre chronologique. Il est à noter qu'on a exclu de cette revue toute méthode de formulation destinée aux BAP spéciaux, comme ; BAP léger, BAP de fibres, BAP de métakaolin, BAP de caoutchouc, BAP de déchets, etc. Le Tab 2.1 donne un sommaire des méthodes de formulation de BAP.

Tableau 2.1 : Sommaire des méthodes de formulation de BAP

Principe	Auteur	Année	Méthode	Pays
Optimisation de mortier	[Okamura & al.]	1993	Japonaise de mortier optimisé	Japon
	[Ouchi & Edamatsu]	1999	Japonaise modifiée	Japon
	[Edamatsu & al.]	2003	Japonaise améliorée	Japon
	[Domone ¹]	2006	UCL	Angleterre
	[Nepomuceno & al.]	2014	Interaction graviers-mortier	Portugal
Optimisation de pâte	[Tangtermsirikul & Bui Van]	1995		Suède
	[Pettersson & al.]	1996	Critères de non blocage et de fluidité	Suède
	[Bui Van & Montgomery]	1999		Australie
	[Oh & al.]	1999	Excès de pâte	Japon
	[Saak & al.]	2001	Contrôle par Ségrégation	USA
	[Wu & An]	2014	Rhéologie de pâte	Chine
Optimisation d'empilement granulaire	[Sedran & de Larrard]	1999	Modèle d'empilement compressible	France
	[Su & al.]	2001	Chinoise de facteur d'empilement	Chine
	[Hwang & Tsai]	2005	Algorithme de formulation densifiée	Chine
	[Brouwers & Radix]	2005	Néerlandaise	Pays-Bas
	[Sebaibi & al.]	2013	Combinaison MEC - FE - NF EN	France
	[Wang & al.]	2014	Brouwers modifiée	USA
	[Ma & al.]	2017	Corrélation graviers-étalement	Chine
Optimisation de résistance à la compression	[Sakata & al.]	1995	Résistance à la compression	Japon
	[Chowdhury & Basu]	2010	BAP de dosage important en CV	Inde
	[Kheder & Al Jadiri]	2010	Combinaison ACI et EFNARC	Irak
	[Dinakar & al.]	2013	Facteur d'efficacité de LHF	Inde
	[Le & al.]	2015	BAPHP contenant différentes AM	Allemagne
Plan d'expérience	[Khayat & al. ²]	1996	Plan factoriel	Canada
	[Ozbay & al.]	2009	Taguchi	Turquie
	[Bouziani & al.]	2014	Plan de mélange	Algérie

2.3.1 Approche d'optimisation du mortier

2.3.1.1 Méthode Japonaise de mortier optimisé

L'équipe d'*Okamura*, les concepteurs Japonais de BAP à l'Université de Kōchi, a proposé la première méthode de formulation du BAP en se basant sur l'optimisation du mortier [*Okamura & Ozawa*] [*Ozawa & al.*]. Cette méthode, dite aussi Japonaise, est basée sur l'approche volumique et considère le béton comme un composé biphasique constitué de graviers et du mortier. Elle consiste à privilégier le volume de pâte au détriment des granulats, à considérer un faible rapport massique eau/liant et à utiliser le superplastifiant [*Okamura & Ouchi*] [*Okamura & al.*].

Au début, le volume des graviers est limité forfaitairement pour éviter tout risque de blocage. Dans le mortier, le volume de sable est posé arbitrairement. Il doit enfin trouver expérimentalement, selon certains critères de rhéologie de mortier, le volume de l'eau et le dosage en superplastifiant dans un liant donné (ciment + addition minérale). Les principes de la formule sont les suivants ;

Volume des graviers : Il doit être limité à l'ordre de 50 % de leur compacité. Par définition, la compacité d'un ensemble des grains est le rapport du volume enveloppe des grains au volume total du contenant (grains + vides). Elle dépend bien sûr du mode de mise en place des grains. Les auteurs n'ont pas dévoilé le type de la compacité considérée lâche ou serrée. À défaut d'indication, plusieurs chercheurs ont choisi la compacité serrée estimée à la table à secousses de LCPC [*Lédée & al.*]. Dans cette méthode, le volume de graviers est très faible et ne dépasse pas 320 l/m^3 .

Volume de Sable : Il est fixé forfaitairement à 40 % du volume de mortier, ce qui donne un rapport volumique graviers/sable autour de 1. Notons que les auteurs considèrent les fines de sable inférieures à $90 \mu\text{m}$ comme poudre incluant au liant.

Dosage en liant (ciment et addition minérale) : La méthode ne précise ni le dosage global en liant (C+AM) ni les dosages séparés en ciment et en addition minérale. Néanmoins, le dosage en ciment peut être fixé selon les données de cahier des charges (soit une masse minimale de ciment de 350 kg/m^3 pour le béton armé). Le dosage en addition minérale peut être choisi sur des critères rhéologiques et de résistances mécaniques. La résistance en compression est corrigée, si nécessaire, en jouant sur les

proportions de liants. Une résistance insuffisante sera compensée par une augmentation du dosage en ciment au détriment d'une addition minérale moins active [Sedran].

Volume d'eau et dosage en superplastifiant : Le rapport volumique ou massique Eau/Liant et la quantité de superplastifiant sont optimisés conjointement par deux essais rhéologiques sur mortiers. Les auteurs définissent alors deux grandeurs adimensionnelles qui sont :

- l'étalement relatif Γ_m , déterminé par un essai d'étalement au mini-cône à mortier (Fig. 2.1), pour caractériser la fluidité ; il s'exprime par la relation [Okamura & Ozawa] :

$$\Gamma_m = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2}$$

- la vitesse relative d'écoulement R_m , déterminée par un essai d'écoulement au mini-entonnoir en V à mortier (Fig. 2.2), pour caractériser la viscosité ; il s'exprime par la relation [Okamura & Ozawa] :

$$R_m = \frac{10}{t}$$

où ; d le diamètre de l'étalement de la galette du mortier en (mm), d_0 la base du cône égale (100 mm) et t le temps d'écoulement à l'entonnoir en (second).

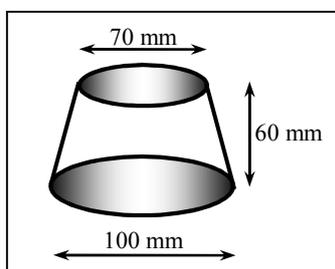


Figure 2.1 : Dimensions de mini-cône de Haegermann destiné à l'étalement de mortier

À l'aide de peu d'essais, on peut tracer les courbes de la vitesse relative d'écoulement R_m en fonction de l'étalement relatif Γ_m pour chaque dosage en superplastifiant tout en variant le rapport massique Eau/Liant (Fig. 2.3). Les auteurs ont montré que la relation entre R_m et Γ_m est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. Il est alors possible de trouver un couple (Superplastifiant-Eau) permettant de fluidifier de manière optimale le mortier. Selon les concepteurs, ce couple est optimal lorsqu'il donne un mortier hautement fluide mais stable, qui égale ($\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$) afin d'obtenir un BAP. Cependant, d'autres chercheurs, trouvent le BAP avec ($\Gamma_m = 10$ et $R_m = 1$) [Rmili] [Turcry] (Fig. 2.4).

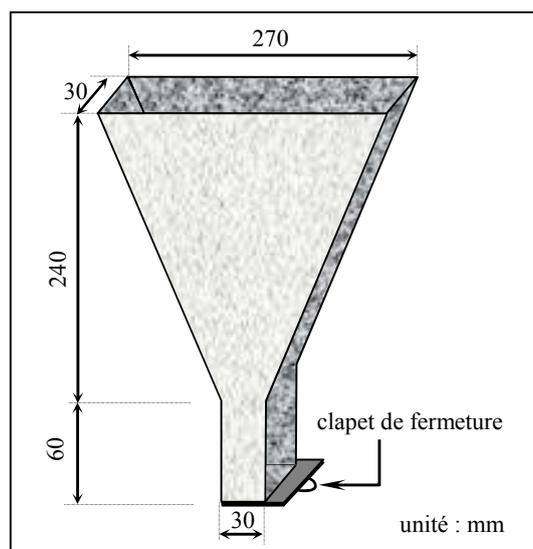


Figure 2.2 : Dimensions de mini-entonnoir en V destiné à l'écoulement de mortier

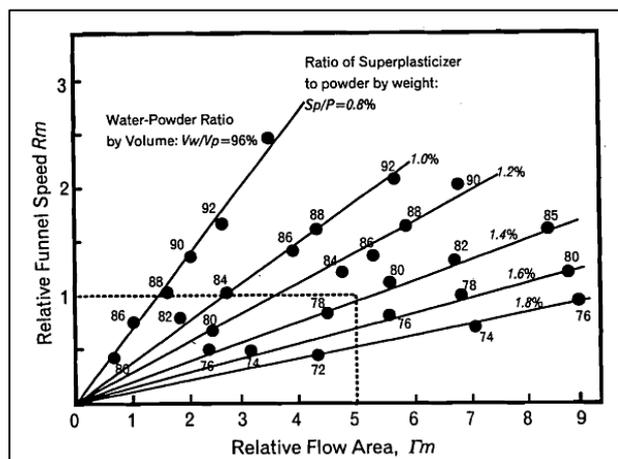


Figure 2.3 : Relation entre l'écoulement relatif R_m et l'étalement relatif Γ_m pour différents dosages en superplastifiant et différents rapports volumiques Eau/Liant [Ouchi & al.]

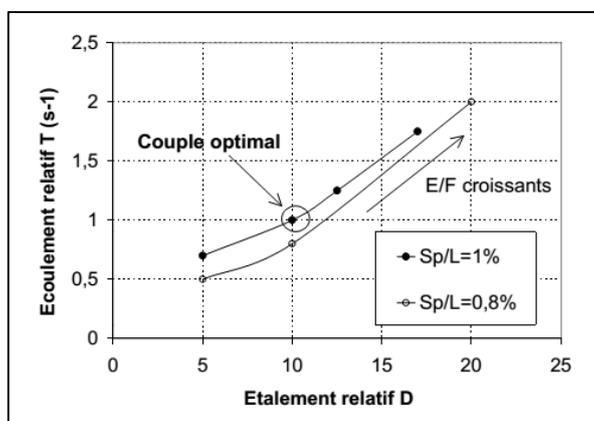


Figure 2.4 : Écoulement relatif R_m en fonction de l'étalement relatif Γ_m – Recherche du couple optimal superplastifiant-eau [Turcry]

Commentaire :

Cette méthode repose à la fois sur une approche forfaitaire pour déterminer les dosages en granulats et une approche expérimentale pour trouver les dosages en eau et en superplastifiant. Elle est très simple dans sa mise en œuvre et permet de formuler des BAP pour une large gamme de résistance mécanique, depuis le BAP maigre, jusqu'au BAPHP.

Néanmoins, dans un souci d'empêcher tout blocage dans les milieux confinés, la méthode conduit à des BAP trop riches en fines et sous dosés en granulats. Les BAP obtenus sont alors couteux d'un point de vue de matériaux, mais ce surcoût engendré peut être compensé par la réduction de la main d'œuvre. De plus, la méthode ne prend pas en compte ni la nature, ni la granulométrie du sable qui déterminent réellement son dosage optimal. Enfin, l'application de la méthode conduit à un dosage très important en superplastifiant proche de son point de saturation, ce qui pourrait entraîner un retard de prise du BAP et augmenter encore une fois son coût.

2.3.1.2 Autres méthodes d'optimisation du mortier

Dans le contexte de l'amélioration technique et économique de la méthode Japonaise, [*Ouchi & Edamatsu*] ont proposé d'optimiser expérimentalement le dosage en graviers en prenant en compte l'effet du confinement. Ils ont cherché leur volume limite qui provoque un blocage par la comparaison de l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans graviers. Encore une fois, [*Edamatsu & al.*] ont amélioré cette méthode en fixant le rapport volumique Eau/Fines et le dosage en superplastifiant.

Après une dizaine d'années de collecte des études concernant la compréhension du comportement de BAP, [*Domone*¹] s'est inspiré de la méthode Japonaise pour proposer une méthode de formulation de BAP nommée UCL (Université Collège de Londres). La méthode estime préalablement les dosages de constituants pour un ensemble de propriétés rhéologiques requises par les directives [*EFNARC*] ou d'autres normes en vigueur. Dans cette méthode, le volume des graviers est initialement estimé de 32 % à 38 % du volume total du béton, et le volume de sable est fixé arbitrairement à 45 % du volume de mortier. Récemment, [*Nepomuceno & al.*] ont proposé d'évaluer l'interaction entre les graviers et le mortier afin de déterminer le dosage maximal en graviers à utiliser dans le BAP.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier est validée par quelques recherches qui montrent à cet effet que la rhéologie du béton se corrèle bien avec celle de son mortier [Billberg] [Jacobs & Hunkeler]. Par ailleurs, la nouvelle méthode du mortier de béton équivalent (MBE) trouve sa justification dans les bétons adjuvantés [Schwartzentruber & Catherine].

2.3.2 Approche d'optimisation de la pâte

Le béton frais est considéré ici comme un composé biphasique constitué d'une phase solide des granulats et autre liquide de la pâte dont le rôle est prédominant dans la maniabilité.

2.3.2.1 Méthode de critères de non blocage et de fluidité

D'abord, [Tangtermsirikul & Bui Van] [Pettersson & al.] ont travaillé sur le confinement des granulats pour réduire le volume de pâte dans le BAP. Ils supposent qu'il existe une quantité minimale de pâte qui assure le non blocage des granulats lors de l'écoulement du béton dans un milieu confiné. En d'autres termes, les auteurs proposent un volume limite maximal des granulats V_{bi} de taille d_i en dessous duquel le risque de blocage est nul. Ce volume est modélisé expérimentalement par une équation linéaire en fonction du rapport de l'espacement e des armatures de la boîte en L et du diamètre d_i (Fig. 2.5).

Le risque de blocage est écrit en fonction du rapport de volume V_i de granulat d_i et de son volume critique V_{bi} :

$$R_b = \sum_i \frac{V_i}{V_{bi}} \leq 1$$

En posant $R_b = 1$, il vient l'expression du volume limite des granulats, pour 1 m³ de béton, au-delà duquel il y a un risque de blocage en milieu confiné.

$$V_b = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g)N_g}{\sum_i \frac{P_{g,i}N_g\rho_s}{V_{g,bi}} + \sum_i \frac{P_{s,i}(1 - N_g)\rho_g}{V_{s,bi}}}$$

Avec ; ρ_g et ρ_s masses volumiques absolues respectives des graviers et du sable (kg/m³), N_g ratio massique des graviers par rapport aux granulats, $P_{g,i}$ et $P_{s,i}$ proportions volumiques des classes granulaires i respectives des graviers et du sable (%), $V_{g,bi}$ et $V_{s,bi}$ volumes limites des classes granulaires i respectives des graviers et du sable.

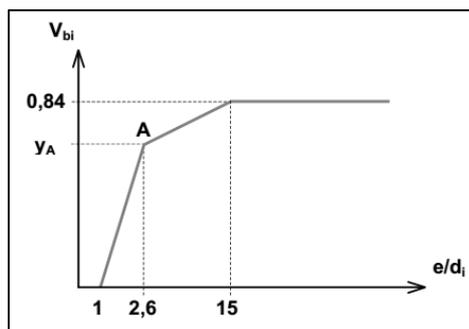


Figure 2.5 : Volume limite de non blocage V_{bi} des granulats en fonction e/d_i [Turcry]

Ensuite, [Bui Van & Montgomery] ont complété cette méthode par la notion de volume minimal de pâte vis-à-vis la fluidité. Ils proposent alors une approche complémentaire qui détermine expérimentalement ce volume limite minimal de pâte $V_{p,\min}$ qui assure la fluidité du BAP par la relation suivante :

$$V_{p,\min} = 1 - \frac{1 - V_v}{C_e}$$

Avec ; V_v volume des vides des granulats et C_e coefficient d'écartement donné par ;

$$C_e = \left(\frac{e_{\min}}{D_{\text{moy}}} + 1 \right)^3$$

Où ; e_{\min} distance minimale entre les granulats pour fluidifier le béton (mm) et D_{moy} diamètre moyen des granulats (mm) donné par ;

$$D_{\text{moy}} = \frac{\sum m_i d_i}{\sum m_i}$$

Où ; d_i diamètre du tamis i (mm) et m_i masse des granulats sur le tamis i (kg).

- Lorsque $C_e = 1$, $V_{f,\min} = V_v$: le volume de pâte remplit la porosité des granulats.
- Lorsque $C_e > 1$, $V_{f,\min} > V_v$: le volume de pâte comble la porosité et écarte les granulats.

Commentaire :

Dans cette méthode, nommée également Suédoise ou CBI, les graviers sont largement prépondérants par rapport au sable pour le critère de blocage. Il y a donc un grand nombre d'essais à réaliser pour obtenir la courbe du volume limite des graviers.

Le critère de blocage donne un volume de pâte de fonction linéaire croissante du rapport massique Graviers/Sable. Du point de vue économique, il serait préférable de choisir un rapport Graviers/Sable le plus faible possible pour limiter la quantité de liant. Cependant,

il est évident que le béton fortement dosé en sable entraîne plus d'air. De manière classique, il vaut mieux choisir le mélange des granulats (sable et graviers) avec une porosité minimale. Le choix du rapport Graviers/Sable pourrait se faire de manière arbitraire de 1 par exemple [Turcry].

La détermination de e_{\min} se fait expérimentalement par confection des bétons ayant des volumes de pâte décroissants. Le volume minimal de pâte pour la fluidité est considéré atteint lorsque l'étalement du béton est inférieur à 65 cm ou lorsqu'il y a ségrégation. Au final, des courbes donnant la distance e_{\min} en fonction de D_{moy} , pour différents rapports massiques Eau/Liant et diamètres maximaux D_{max} des graviers, sont obtenues. Les auteurs n'ont choisi que ces trois paramètres ($E/L, D_{\text{moy}}, D_{\text{max}}$) pour décrire e_{\min} au détriment, par exemple, du dosage en superplastifiant. Ils expliquent ce choix par un souci de simplicité du modèle [Turcry].

Dans cette méthode, le rapport Eau/Liant est imposé normalement par le critère de fluidité, mais on peut le fixer pour des raisons de résistances mécaniques et d'ajuster l'étalement du béton en jouant sur le dosage en superplastifiant.

2.3.2.2 Autres méthodes d'optimisation de la pâte

[Oh & al.] ont introduit la notion de la pâte en excès pour expliquer le mécanisme de la maniabilité de BAP. Ils supposent trois volumes dans le béton ; le volume des granulats compactés V_{gc} , le volume de pâte compactée V_{pc} nécessaire pour remplir les vides intergranulaires (porosité), et le volume d'excès de pâte V_{pe} qui couvre les granulats et assure la fluidité. Le volume total de la pâte est bien sûr $V_p = V_{pc} + V_{pe}$.

[Saak & al] ont développé un modèle de rhéologie de pâte pour formuler le BAP. La méthode suppose que la ségrégation du béton s'effectue par le seuil de cisaillement, la viscosité et la densité de la matrice de pâte de ciment. En tenant compte la distribution granulométrique des granulats, la méthode fait le passage de pâte au béton. De plus, ils ont proposé de dépasser les minimums de seuil de cisaillement et de viscosité de pâte pour éviter les ségrégations statiques (repos) et dynamiques (écoulement) respectivement.

Récemment, [Wu & An] ont développé une méthode de formulation de BAP sur la base du modèle théorique et des résultats expérimentaux qui caractérise la rhéologiques de la matrice de pâte. La méthode propose des corrélations entre les propriétés rhéologiques de

pâte et mortiers et puis le passage au béton. La procédure de formulation exige un seul essai très simple d'étalement au mini-cône de pâte pour déterminer le rapport volumique Eau/Pâte et le dosage en superplastifiant dans le BAP, et les dosages obtenus ne nécessitent pas d'ajustement. En utilisant cette méthode, on pourrait prédire les propriétés fraîches de BAP à partir des caractéristiques rhéologiques de sa pâte, ce qui réduit le temps et les matériaux nécessaires pour produire le BAP. Les auteurs de cette méthode indiquent qu'ils peuvent formuler le BAP à base de 100% filler calcaire sans ciment.

2.3.3 Approche d'optimisation du squelette granulaire

Le béton est considéré ici comme un composé biphasique constitué d'une phase solide de l'empilement des grains (fines, sable et graviers) et une phase interstitielle de l'eau, ce qui rend toute formulation du béton un problème de compacité de cet empilement. À quantité d'eau constante par exemple, l'avantage d'une compacité maximale (porosité minimale) de l'empilement granulaire se traduit principalement par un volume maximal d'eau libre disponible pour fluidifier le mélange. De même, pour une même maniabilité, il est possible d'abaisser la quantité d'eau avec tous les avantages que ceci comporte (résistances élevées, perméabilité réduite, etc.).

2.3.3.1 Méthode de modèle d'empilement compressible

Dans le contexte de formuler le BAP par optimisation de la structure granulaire, [*Sedran & de Larrard*] ont développé une méthode basée sur leur modèle d'empilement compressible MEC.

Le MEC décrit mathématiquement la compacité d'un empilement granulaire à plusieurs classes à partir des caractéristiques suivantes : compacités et proportions de classes monodimensionnelles ; distribution granulaire et énergie de mise en place de l'empilement. Le MEC s'appuie sur deux notions, décrites ci-après, la compacité virtuelle et de l'indice de serrage représentant la compacité réelle. En se basant sur ces paramètres, le comportement rhéologique du BAP est décrit numériquement comme un modèle de Bingham (viscosité et seuil de cisaillement). À l'aide du rhéomètre BTRHEOM, développé par [*de Larrard & al.*³] au LCPC, la cratérisation de béton frais est expérimentalement réalisée.

À la base de MEC, les auteurs ont également développé le logiciel René-LCPC qui calcule la compacité d'un empilement granulaire quelconque et puis un autre plus perfectionné Béton-Lab Pro qui permet de plus de simuler les propriétés du béton (résistances, déformations différées, etc.).

Compacité virtuelle γ : C'est la compacité maximale que l'empilement granulaire peut avoir en le plaçant grain par grain (arrangement optimal virtuel correspondant à une énergie de mise en place infinie). Pour un mélange de n classes granulaires, la compacité virtuelle partielle γ_i de classe granulaire de tailles d_i , supposée dominante, s'écrit :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{j=i-1} \left(1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right) y_j - \sum_{j=i+1}^{j=n} \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right) y_j}$$

Où ; y_j proportion volumique de classe granulaire de tailles d_j ; β_i compacité virtuelle propre (résiduelle) de classe d_i prise isolément ; a_{ij} et b_{ij} coefficients empiriques servant à modéliser respectivement les effets de desserrement et les effets de parois d'une classe granulaire sur une autre.

Indice de serrage K : C'est une grandeur caractérisant l'énergie fournie pour la mise en place de l'empilement granulaire. Il dépend donc du mode de mise en place et du type de compaction (versement simple, piquage, piquage, vibration, compactage, etc.). Un empilement ne peut pas atteindre sa compacité virtuelle et sa compacité réelle est liée directement à cet indice de serrage. Pour une compacité réelle ϕ donnée de l'empilement granulaire, l'indice de serrage K est donné par la somme des indices partiels K_i de chaque classe granulaire d_i et s'écrit :

$$K = \sum_{i=1}^{i=n} K_i = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\gamma_i}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}}$$

L'indice de serrage K est une fonction strictement croissante de la compacité réelle ϕ . Pour K infini, la compacité réelle ϕ est égale à la compacité virtuelle γ . Le fait de fixer la valeur de K , pour un empilement granulaire donné, fournit alors une équation implicite à une seule solution : la compacité réelle prévue par le modèle. [Ferraris & de Larrard] recommandent un indice de serrage $K = 7$ pour le BAP.

Commentaire :

Cette méthode de MEC, appelée également LCPC ou Française, est considérée presque rationnelle au monde de formulation de béton. D'après [Turcry], c'est la méthode la plus satisfaisante en comparant avec celles des [Okamura & al.] [Tangtermsirikul & Bui Van], [Pettersson & al.] et [Bui Van & Montgomery] puisqu'elle permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations. Néanmoins, [Shi & al.¹] indiquent que cette méthode se concentre sur l'optimisation du squelette granulaire du béton du point de vue de la densité de l'empilement, ce qui parfois pourrait entraîner une très faible teneur en pâte engendrant une perte rapide de l'étalement et de blocage lors du pompage.

2.3.3.2 Autres méthodes d'optimisation du squelette granulaire

[Su & al.] ont proposé la méthode Chinoise dont le principe est de diminuer au minimum possible le volume des vides de l'empilement granulaire (sable et gravier ensemble) dans un état lâche, et puis de remplir la pâte du liant dans ces vides. La méthode se base sur la notion de facteur d'empilement PF qui représente la densité apparente des granulats empilés dans le BAP (état compacté par rapport à la densité apparente des granulats lâches). Cette méthode est théorique dans sa conception et empirique pour l'ajustement des dosages définitifs des constituants [Rmili]. Elle conduit à économiser les constituants les plus coûteux, à savoir le ciment et les additions minérales, en favorisant l'utilisation des granulats.

[Brouwers & Radix] ont proposé la méthode Néerlandaise qui se base sur les méthodes Japonaise [Okamura & al.] et Chinoise [Su & al.]. Elle consiste à améliorer la distribution granulométrique et la compacité de l'empilement de tous les grains solides afin de réduire la quantité de pâte nécessaire à remplir les vides. Cette méthode vise à répondre aux exigences du BAP tout en utilisant les matériaux les plus économiques. Cependant, elle devient plus longue et nécessite plus des essais de caractérisation.

[Hwang & Tsai] ont proposé une méthode d'algorithme de formulation densifiée (MAFD) qui se base sur les théories de la densité maximale et la pâte en excès. La méthode est constituée d'abord d'obtenir l'empilement de grains les plus dense, qui donne un volume minimal des vide, par itération des empilements donnés, puis de trouver la teneur en pâte qui donne les meilleures performances. Les auteurs considèrent que les 3

types des empilements de grains (primaire, dense et discontinu) et les 5 teneurs en pâte (1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 de vides des granulats) sont des paramètres majeurs pour évaluer les propriétés de BAP. L'AMFD est une approche bien adaptée au BAP durable puisqu'elle vise le moins de vide dans l'empilement des grains. Elle vise également le minimum d'eau et de ciment en ajoutant la cendre volante dans la pâte de liant pour combler les vides.

[Sebaibi & al.] ont également proposé une méthode de formulation de BAP en utilisant le modèle d'empilement compressible, la méthode Chinoise et la Norme Européenne de béton. Ils ont alors exploité le logiciel RENÉ-LCPC pour optimiser la combinaison des granulats, la méthode Chinoise pour estimer les volumes des granulats et le dosage en ciment et la norme [NF EN 206] pour calculer le dosage en fumée de silice qui est utilisée pour augmenter les résistances mécaniques. Une courbe a été élaborée pour choisir le rapport E/C en fonction de la résistance à la compression. Les BAP obtenus par cette méthode contenant plus de granulats et moins de liant.

Récemment, [Wang & al.] ont développé un algorithme de la méthode de formulation Néerlandaise après modification. L'objectif de cette méthode, appelée *Brouwers modifiée*, est d'améliorer l'empilement des grains afin de réduire la quantité de pâte tout en conservant les performances du BAP. Ils ont conçu un empilement très étendu constituant différents types et tailles de granulats et ajouts cimentaires pour avoir un module de distribution granulométrique continue q compris entre 0.23 et 0.29. Les BAP formulés peuvent réduire la teneur en liant jusqu'à 20% par rapport aux méthodes existante, ce qui rend le BAP plus économique.

Dernièrement, [Ma & al.] ont proposé de déterminer le diamètre moyen et le volume des graviers en fonction de l'étalement visée pour le BAP. Selon des analyses effectuées entre l'étalement et les graviers, les auteurs ont constaté que l'étalement préférable est trouvé lorsque les graviers peuvent s'écouler en état compact d'une seule couche.

2.3.4 Approche d'optimisation de la résistance à la compression

Ces méthodes déterminent les dosages des constituants en fonction de la résistance à la compression requise.

2.3.4.1 Méthode de critère de résistance

[Sakata & al.] sont les premiers qui ont développé une méthode de formulation de BAP répondant à la résistance à la compression. La méthode commence par fixer les dosages en superplastifiant et agents colloïdal à l'aide des abaques développés à partir des résultats expérimentaux. Une des caractéristiques de base de cette méthode est que la quantité totale des granulats est constante. Les étapes de la méthode sont les suivantes ;

Rapport massique Eau/Ciment : La particularité de cette méthode est que l'on peut déterminer directement le rapport E/C en fonction de la résistance à la compression à 28 jours ciblée $R_{c_{28}}$ par la relation suivante :

$$E/C = 19.2/(R_{c_{28}} - 5.8)$$

Teneur en eau : la quantité d'eau efficace E est trouvée selon la fluidité et la résistance à la ségrégation désirées à l'aide des abaques développés.

Dosage en ciment : À partir de rapport E/C et la quantité d'eau qui sont déjà déterminés, on peut déduire le dosage en ciment nécessaire.

Volume d'air : Il est estimé forfaitairement de 2 % de volume total de béton.

Dosage préliminaire en graviers : Il est déterminé en multipliant la masse volumique apparente des graviers par la valeur correspondante au module de finesse du sable dans le Tab. 2.2.

Volume préliminaire du sable : Une fois les volumes des graviers, ciment, eau et air sont déterminés, on peut déduire le volume préliminaire du sable.

Dosage en additions minérales : Elles remplacent ici une partie des granulats en multipliant la densité absolue des additions minérale par 20 % de la masse de sable. Notons que les auteurs ont utilisé le filler calcaire comme ajout dans leur méthode.

Correction des volumes des graviers et du sable : Il s'agit enfin de trouver le rapport massique Sable/Granulats, désignée par S/A ; A agrégats, égale à 42.5 ou 52.5% selon le type de BAP désiré.

Dosage en superplastifiant : Pour atteindre la fluidité désirée, on ajuste la teneur en superplastifiant qui dépend à la nature du sable et au mode de malaxage.

Dosage en agent de viscosité : À l'aide de Tab. 2.3, l'agent de viscosité est déterminé en fonction des rapports S/A , et E/C et de la teneur en eau.

Tableau 2.2 : Coefficient du calcul de dosage en graviers de la méthode [Sakata & al.]

Module de finesse de sable : MF	2.40	2.60	2.80	3.00
Coefficient correspondant	0.65	0.63	0.61	0.59

Tableau 2.3 : Teneur en agent de viscosité en fonction des E/C et S/A de la méthode [Sakata & al.]

E/C	0.4		0.5		0.6	
	E (l)	AV (kg)	E (l)	AV (kg)	E (l)	AV (kg)
52.5	155	0	170	1.5	180	5
	165	1.5	180	3	190	7
	175	3	190	4.5	200	9
42.5	155	1.5	170	3	180	7
	165	3	180	4.5	190	9
	175	4.5	190	6	200	11

2.3.4.2 Autres méthodes d'optimisation de la résistance à la compression

[Dinakar & al.] ont proposé une méthode pour formuler le BAP à base de laitier de hauts fourneaux avec une large gamme de résistances. La méthode se base sur la notion de facteur d'efficacité k qui est défini ici comme le dosage efficace du laitier capable de faire la réactivité hydraulique comme le ciment Portland. Cette méthode considère la contribution efficace des matériaux pouzzolaniques, comme le laitier, aux propriétés mécanique de BAP. En effet, elle présente les avantages de confectionner des BAP de résistances moyenne de 30 MPa en ajoutant des quantités importantes des laitiers allant jusqu'à 80%, ou des BAP à hautes résistances, qui peut atteindre 100 MPa, avec 10% de LHF. Par ailleurs, la méthode offre une procédure claire et précise pour obtenir tous les dosages de constituants. Néanmoins, l'une de ses faiblesses est qu'elle nécessite plusieurs ajustements pour obtenir les dosages optimaux de formulation.

En se basant sur les résultats de plusieurs méthodes de formulation de BAP par différents principes, [Chowdhury & Basu] ont développé une méthode adaptée au BAP contenant un volume très élevé de cendre volante. Les dosages en constituants sont déterminés en fonction de critères explicites de résistance et de rhéologie. Les propriétés de BAP à l'état fais sont dérivées par des corrélations avec les paramètres rhéologiques de pâte-mortier correspondant. Les auteurs considèrent que les résistances mécaniques du béton

dépendent principalement à celles du mortier. À partir de mortier et béton standards, des équations sont établies pour exprimer les résistances de mortier-béton en fonction du rapport Eau/Liant. Concernant la formule, la quantité des fines est d'abord déterminée à partir de la résistance ciblée. Les dosages en superplastifiant et en sable sont ensuite déterminés par les critères rhéologiques visés. Le volume des graviers est enfin calculé en utilisant la méthode du volume absolu qui sert également à ajuster la formulation finale. Cette méthode peut proportionner les constituants de BAP pour des exigences rhéologiques et mécaniques préalablement ciblées tout en réduisant le nombre d'essais effectués.

[*Kheder & Al Jadiri*] ont proposé une méthode simple pour la formulation de BAP par combinaisons de deux méthodes ; la norme [*ACI 211.1*] pour le BO et les directives [*EFNARC*] pour le BAP. Dans cette méthode, le dosage en graviers a été déterminé en fonction de leur taille maximale et du module de finesse de sable. La teneur en eau dépend de la taille maximale des graviers et de la résistance à la compression ciblée. La méthode [*ACI 211.1*] d'origine couvre la gamme de la résistance à la compression de 15 à 40 MPa, mais cette méthode élargit la gamme à hautes résistances de 15 à 75 MPa pour couvrir le BAPHP.

Dernièrement, [*Le & al.*] ont proposé une méthode de formulation pour le BAPHP contenant différents types des additions minérales. À notre connaissance, c'est la seule méthode qui est offerte à ce type de béton proprement dit BAPHP. Cette méthode est similaire à celle de [*Dinakar & al.*] mais elle se base sur les approches Chinoise et Néerlandaise pour déterminer les teneurs en granulats. Ici, les proportions des constituants sont calculées par la méthode du volume absolu. Les granulats sont déterminés selon le modèle de l'empilement à distribution granulométrique continue de [*Funk & Dinger*] avec un exposant $q = 0.25$. Le volume de pâte primaire pour la capacité de remplissage est déterminé en fonction du volume des vides intergranulaires compactés. Le dosage en superplastifiant pour le béton est établi à la base de dosage de saturation du mortier correspondant. Les facteurs d'efficacité, qui déterminent la réactivité hydraulique des matériaux pouzzolaniques, sont utilisés pour exprimer l'effet des additions minérales sur la résistance à la compression du béton. Les BAPHP développés contenant des liants ternaires, ciment et deux additions minérales différentes (cendre d'écorce de riz, fumée de silice, cendre volante et filler calcaire).

2.3.5 Approche du plan d'expérience

L'utilisation des plans d'expérience comme approche de formulation de BAP est intéressante pour connaître également les effets de paramètres de la composition sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. À l'aide des méthodes proposées par ces plans d'expérience, on peut écrire des réponses en fonction des facteurs sous forme des équations mathématiques. La modélisation des réponses en fonction des paramètres de l'étude est faite maintenant grâce aux logiciels d'analyse statistique.

2.3.5.1 Méthode de plan factoriel

L'équipe de *Khayat* a développé des modèles factoriels qui prévoient les effets combinés des divers paramètres de la composition sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP. Ces modèles, représentés sous formes des courbes, permettent ainsi de faire des corrélations entre ces propriétés et d'élaborer un protocole de proportionnement et d'optimisation de la formulation [*Khayat & al.*¹] [*Khayat & al.*²].

Les auteurs ont choisi cinq facteurs clés de la composition suivants ; volume de graviers, dosage en liant (ciment + additions minérales), rapport massique eau/liant, dosage en superplastifiant et dosage en agent de viscosité. Les réponses modélisées sont ; l'affaissement, l'étalement, la capacité et le temps de remplissage, la résistance à la ségrégation statique et dynamique et la résistance à la compression à 7 et 28 jours. En se basant sur ces modèles, les auteurs ont conçu le logiciel AUTOBAN qui permet de calculer les principales caractéristiques du BAP à partir de sa composition, ou à l'inverse, d'estimer les dosages à partir des caractéristiques souhaitées.

Commentaire :

Cette méthode, purement empirique, permet certes de trouver des formulations optimales de BAP mais après un nombre d'essais très important. En plus, les modèles statistiques développés ne sont exploitables que pour les matériaux utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit notamment un support pour corriger une formule qui ne répond pas aux critères de BAP [*Turcry*].

2.3.5.2 Autres méthodes du plan d'expérience

[*Ozbay & al.*] ont fait une investigation sur les paramètres des dosages de BAP à hautes résistance en utilisant la méthode de plan d'expérience de conception expérimentale de Taguchi pour une formulation optimale. La méthode de Taguchi vient pour simplifier le protocole expérimental pour mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse.

[*Bouziani & al.*] ont développé une méthode qui se base sur les plans de mélange, avec trois facteurs et cinq niveaux, pour formuler des BAP à base de différents types de sables.

2.4 Conclusion

Depuis le développement du BAP en 1988, plusieurs méthodes ont été proposées pour sa formulation, notamment lors et après la 1^{ère} Conférence internationale de RILEM sur le BAP à Stockholm en 1999, qui a été considérée comme l'essor historique de ce type de de béton au monde de construction.

Le problème de formulation de BAP n'a pas de solution unique universelle, mais plutôt une très large gamme de solutions qui tient en compte les matériaux locaux disponibles et qui peut donner un résultat satisfaisant à chaque situation particulière.

Une synthèse bibliographique a été menée pour présenter et discuter les méthodes de formulation des BAP selon leur principe de conception. Elle nous a permis de dresser les conclusions suivantes :

- À l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode de formulation généralisée pour le BAP permettant de choisir précisément les dosages des constituants en fonction de ses 4 propriétés essentielles (fluidité, déformabilité, stabilité et résistance à la compression). Les méthodes disponibles sont toutes semi-empiriques, relativement complexes et peu précises.
- Bien que le concept et le procédé soient différents d'une approche à l'autre, la majorité méthodes conduit à formuler correctement le BAP et même le BAPHP. Néanmoins, l'infinité des données disponibles et le manque des critères uniformes compliquent le traitement et la comparaison des méthodes.

- Il est difficile parfois de classer les méthodes selon leur principe, et notamment entre les approches de l'optimisation de la pâte et celles de l'optimisation de l'empilement granulaire, puisque les deux cherchent un volume minimal de pâte qui assure les propriétés rhéologiques de BAP.
- Toutes les méthodes demandent un certain nombre d'essais pour identifier les constituants et ajuster les formulations obtenues. Les essais en laboratoire sont donc indispensables pour formuler le BAP.
- Les méthodes du mortier sont basées sur des procédures simples et claires. Elles sont toutes à l'origine de la méthode Japonaise qui est considérée comme support essentiel pour rationaliser les approches actuelles de la formulation.
- Les méthodes de la pâte conduisent à optimiser directement le volume et la rhéologie de pâte. Or, le passage de pâte au béton n'est pas très clair. Ces méthodes servent beaucoup plus au développement de nouveaux matériaux comme les additions minérales et les adjuvants.
- Les méthodes d'empilement granulaire sont presque rationnelles et offrent des compacités maximales aux granulats. Les méthodes Française et Chinoise sont satisfaisantes par plusieurs chercheurs. Par ailleurs, la méthode Néerlandaise profite des méthodes Chinoise et Japonaise pour définir au départ une formulation convenable sans recours à beaucoup d'essais d'ajustement.
- Les méthodes de la résistance à la compression présentent une procédure claire pour formuler un BAP répondant à l'exigence de résistance qui est souvent négligée par les autres approches. En outre, elles tiennent compte de la distribution granulométrique continue des granulats, et de la contribution de la réactivité hydraulique et pouzzolaniques des additions minérales à la résistance en compression de BAP. Cependant, Ces méthodes nécessitent beaucoup d'ajustement pour tous les dosages des constituants.
- Les méthodes du plan d'expérience peuvent prédire toutes les propriétés de BAP grâce aux modèles statistiques développés. Cependant, elles sont purement expérimentales et nécessitent des essais intensifs pour établir ces modèles.

CHAPITRE 3 : INFLUENCE DE COMPOSITION SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP-BAPHP

3.1 Introduction

L'optimisation du béton serait compliquée lorsqu'on s'intéresse au BAPHP ayant des constituants nombreux et assez différents à ceux de BO. En effet, le BAPHP ayant au moins six constituants ; graviers, sables, ciment, additions minérales, eau, superplastifiant et éventuellement agent de viscosité et/ou fumée de silice. En plus, le BAPHP est considéré comme un mélange à deux phases différentes ; phase solide discontinue de renfort et phase liquide continue de matrice. Ses constituants sont généralement disposés de façon que les phases soient ; empilement des grains et eau, granulats et pâte du liant, ou encore graviers et mortier.

Ce chapitre présente un état de l'art qui recense les résultats de recherches concernant l'influence de différents types de sables et additions minérales sur les propriétés aux états frais et durci des BO, BAP et particulièrement BAPHP. Il présente également la faisabilité de fabriquer des BAP-BAPHP en utilisant les matériaux locaux ; tels que ; sable de carrière, sable de dune, filler calcaire, pouzzolane naturelle, et laitier granulé.

3.2 Incorporation des sables

Selon la norme [NF EN 12620+AI], les sables destinés à la confection de béton est un ensemble des grains minéraux dont la dimension maximale D n'excédant pas 4 mm. Ils sont issus de l'altération naturelle ou de concassage des roches massives et meubles, ou du traitement des granulats artificiels.

En fonction des gisements et des techniques de production, les sables se distinguent entre eux par plusieurs paramètres ; nature minéralogique, type, forme, dureté, taille, granulométrie, densité, porosité, qualité, etc.

Les sables peuvent avoir trois origines ; naturelle, artificielle ou recyclée. Selon leur composition minéralogique, les sables peuvent être classés en quatre types ; siliceux, silico-alumineux, silico-calcaire et calcaire. Leur granulométrie permet de les différencier en trois classes ; sable fin, sable moyen et sable grossier. On distingue enfin deux formes de sables ; sable roulé et sable concassé (angulaire).

Les sables disponibles en Algérie, couramment utilisés dans les constructions de génie civil, les travaux publics et l'hydraulique, se regroupent en trois familles ; sable de rivière, sable, sable de carrière et sable de dune.

Le sable de rivière SR est un sable alluvionnaire, naturel, siliceux, à grains roulés. Il peut résulter de l'érosion des roches sédimentaires et peut être obtenu par l'exploitation des gisements ou des sablières en dépôts des alluvions trouvés dans les lits des rivières. Ses classes granulométriques sont généralement 0/3 et 0/5 mm.

3.2.1 Incorporation du sable de carrière dans le BO

Le sable de carrière SC est un sable généralement calcaire ayant des grains concassés de forme angulaire. Il est issu des processus industriels de concassage, lavage et criblage appliqués à des roches sédimentaires massives dans les carrières. Il est livré sous plusieurs classes granulométriques généralement de 0/3 et 0/6.3 mm avec une quantité plus ou moins importante de fillers ($< 80 \mu\text{m}$) selon la nature des roches mères et le mode d'élaboration.

Le sable de carrière est considéré arbitrairement comme sous-produit peu intéressant. Son utilisation est rare dans la construction de génie civil (remblai et enduit et crépissage en ciment) et se limite à quelques travaux des routes et d'hydraulique (terrassement, béton compacté au rouleau et enrobé bitumineux). La formulation du béton en utilisant le sable de carrière semble qu'une tentative intéressante du point de vue technique, économique et environnemental et qui peut soulager davantage le monde de construction.

Le sable de carrière contient généralement des teneurs élevées en fines calcaires. C'est pourquoi, les formulateurs du béton recourent pratiquement à ce type de sable pour corriger les défauts éventuels dans la granulométrie du sable de rivière. Plusieurs recherches ont été menées pour valoriser le sable de carrière dans la confection du mortier,

microbéton et béton. Elles montrent que lorsque le sable de carrière, ayant de bonnes caractéristiques physiques et propriétés mécaniques, peut améliorer les performances rhéologiques, mécaniques et même la durabilité de ces matériaux cimentaires [Ahour] [Bedday] [Bederina & al.] [Joudi-Bahri].

Cette amélioration est attribuée grâce essentiellement à sa nature calcaire, sa forme concassée, sa granulométrie étalée et sa finesse. En effet, [Ahour] fait l'hypothèse que la présence des fines calcaire de même nature que les granulats contribue à améliorer l'adhérence pâte-granulats, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. Il s'est souvent prétendu que l'adhérence pâte-granulats détermine la résistance du béton [Liao & al.] [Gao & al.]. Par ailleurs, la forme angulaire offre plus d'enchevêtrement entre les grains et plus d'adhérence pâte-granulats, ce qui donne également plus de résistances [de Larrard & Belloc]. Ainsi, [Bedday] montre que le sable de carrière doit être optimisé en teneur en fines, qui est considérées comme une addition de filler calcaire, pour améliorer la fluidité et la résistance du béton. [Joudi-Bahri] trouve un comportement identique même avec le béton superplastifié. En fait, Ces fines jouent le rôle d'un lubrifiant des graviers pour diminuer le frottement intergranulaire et d'un matériau de remplissage pour améliorer la granulométrie et augmenter la compacité.

3.2.2 Incorporation du sable de dune dans le BO

Le sable de dune SD est un sable généralement pur siliceux ou silico-calcaire, à grains roulées ou peu angulaires. Il est issu de l'érosion très lente des roches sédimentaires dures ou meubles dans le désert. Il est extra-fin de granulométrie très serrée de l'ordre de (0/0.63 mm.) et contenant des quantités très importantes des fines qui peut aller jusqu'à 40%.

Le sable de dune est abondant dans le désert à coût d'extraction presque nul. Son utilisation est limitée à quelques applications de terrassement et de finition (remplissage et comblement de tranchées, lit de sable, etc.). L'exploitation du sable de dune dans la formulation du béton peut apporter également une solution économique et écologique intéressante.

Il s'avère que l'incorporation du sable de dune dans le béton a posé auparavant des problèmes techniques à cause de sa demande d'une quantité très importante en eau de

gâchage, ce qui affecte directement les résistances mécaniques et le retrait du béton. Or, l'évolution de la technologie des adjuvants, notamment le superplastifiant, permet actuellement de trouver les solutions adéquates en ce qui concerne cette demande en eau. L'emploi de sable de dune exige donc une justification vis-à-vis des performances du béton.

Avec ce principe, Il y a récemment une attention croissante de bénéficier la quantité élevée des fines siliceuses que le sable de dune possède pour modifier le comportement rhéologique et mécanique du béton. En effet, plusieurs recherches montrent la faisabilité technique et les opportunités intéressantes d'ajouter le sable de dune, en proportions bien déterminées, dans le mortier et béton [Al-Harthy & al.] [Luo & al.] [Zhang & al.]. En effet, [Luo & al.] montrent que, lorsque le rapport Sable/Ciment est faible ($S/C < 1.41$), l'utilisation de sable de dune n'a pas d'effet négatif sur la maniabilité et peut donner une résistance comparable ou même supérieure à celle du béton composé de SR. Ces résultats sont attribués puisque le sable de dune utilisé est ultrafin ($D < 175 \mu\text{m}$) dont les fines peuvent ; combler les vides entre la pâte de ciment et les granulats, attribuer de la nucléation hétérogène et apporter l'activité pouzzolanique qui améliore l'hydratation du ciment. Par contre, à un rapport élevé de Sable/Ciment ($S/C > 1.41$), les fines excessives absorbent une grande quantité d'eau sur leur surface, réduisent la maniabilité du béton et interdisent plus de bulles d'air lors de compactage. Par ailleurs, [Al-Harthy & al.] montrent que la substitution progressive du sable de rivière par le sable de dune jusqu'à la moitié peut améliorer l'affaissement du béton. Par contre, la résistance à la compression diminue légèrement (réduction maximale $< 25\%$) avec l'augmentation de teneur en sable de dune qui n'a pas d'effet négatif appréciable sur et la résistance à la traction et le module d'élasticité.

3.2.3 Alternative de substituer le SR par le SC et le SD dans le BAP

La plupart des formulateurs de BAP considèrent les fines apportées par les granulats, dont la taille maximale est inférieure à $80 \mu\text{m}$, voire à $125 \mu\text{m}$, comme des additions minérales. Contenant une quantité importante des fines, les sables de carrière et de dune pourraient être donc une autre source des additions minérales dont le BAP a besoin. L'incorporation de ces sables, en substituant le sable de rivière, a fait l'objet de quelques travaux de

recherche. Cette substitution, partielle ou totale, est souvent faite par des combinaisons massiques binaires ; SC+SR, SD+SR et SC+SD, et parfois une combinaison ternaire SC+SD+SR est prise en compte. Les résultats de littérature montrent que le type, la forme et la granulométrie des sables exercent l'effet majeur sur les propriétés du BAP à l'état frais et durci.

En se fondant sur des travaux de recherches antérieurs, les effets des combinaisons de différents types de sables sur la composition, les paramètres de la maniabilité et les résistances mécaniques du BAP sont détaillés ci-dessous.

2.3.1.1 Effets de combinaison des sables sur la composition

[*Rmili*] a étudié expérimentalement l'effet de trois types de sables (SR ; SC ; SD) sur la composition, les paramètres de la maniabilité et les propriétés mécanique du BAP. Il a trouvé, à l'aide du logiciel René-LCPC, que les combinaisons qui donnent les porosités minimales (compacités maximales) pour les empilements des sables secs sont : (30%SR+70%SC), (80%SR+20%SD) et (85%CS+15%SD), comme le montre la Fig. 3.1. En plus, [*Rmili*] a indiqué que les combinaisons binaires des sables (SR+SC ; SR+SD ; CS+SD) induisent à une augmentation de leurs masses volumiques apparentes et par conséquent à la réduction des vides intergranulaires. Dans la formulation, il a montré également que les combinaisons binaires permettent de diminuer la demande en eau et le besoin en addition minérale de type filler calcaire par rapport aux sables non combinés.

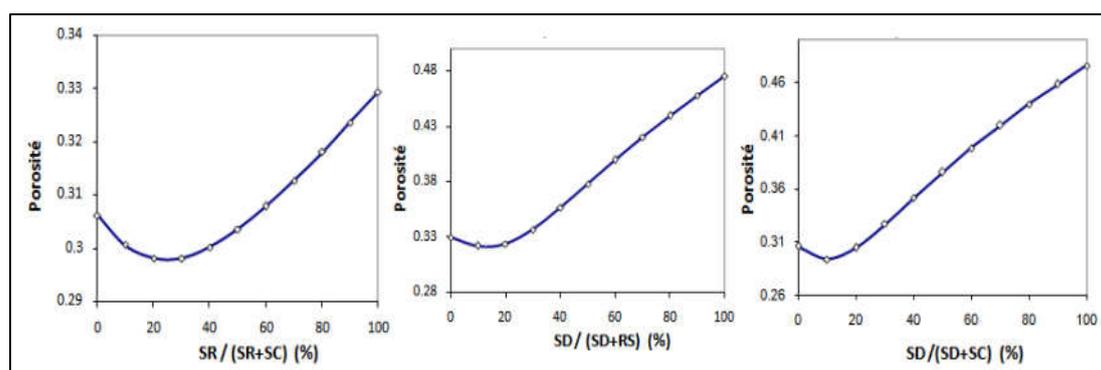


Figure 3.1 : Porosités en fonction des combinaisons des sables [*Rmili*]

Également, [*Bouziyani & al.*] ont proposé une modélisation statistique pour évaluer l'influence des types de sables sur la densité apparente des empilements des sables secs, la fluidité et la capacité de passage du BAP. À l'aide du logiciel JMP7, les trois sables

(SR ; SC ; SD) sont combinés au modèle du plan de mélange par proportion de 20% pour chaque sable en obtenant finalement 21 combinaisons binaires et ternaires. Ils ont rapporté que l'augmentation des proportions des sables de carrière et de dune augmente la densité des combinaisons binaires (SR+SC) et (SR+SD) et la combinaison ternaire (SR+SC+SD), jusqu'à une valeur maximale 1.67 qui correspond à une combinaison environ de (30%SR+40%SC+30%SD). La Fig. 3.2 représente un exemple de la réponse ternaire de la densité apparente des combinaisons des sables en fonction de leurs proportions massiques. Le modèle dérivé de la densité des sables sec SPD est donné par l'équation suivante avec un coefficient de corrélation assez faible ($R^2 = 0.52$) ;

$$SPD = 1.5 SR + 1.5 SC + 1.6 SD + 0.33 (SR \cdot SD) + 0.37 (SR \cdot SC) + 0.34 (SC \cdot SD)$$

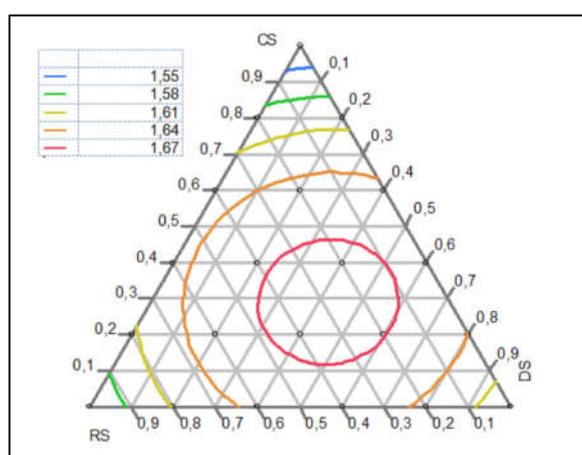


Figure 3.2 : Courbe ternaire de la réponse de densité apparente des combinaisons de sables (SR ; SC ; SD) en fonction de leurs proportions massiques [Bouziani & al.]

2.3.1.2 Effets de combinaison des sables sur la maniabilité

D'après l'étude précédente de [Rmili], les bétons à base de 100%SR et 100%SC donnent généralement des BAP acceptables, tandis que celui qui contient 100%SD ne répond pas aux critères autoplaçants. De plus, l'ajout progressif de sable de carrière au sable de rivière provoque une légère diminution aux paramètres de fluidité et de déformabilité (étalement au cône d'Abrams, temps d'écoulement à l'entonnoir, capacité de remplissage aux boîtes en L et en U). Cette combinaison des sables admet un optimum de (30%SC+70%SR) dont les BAP sont satisfaits même pour des dosages faibles et modérés en superplastifiant (1 à 1.3%). Cependant, la stabilité au tamis de BAP est améliorée systématiquement à l'augmentation de teneur de sable de carrière dans la combinaison (SR+SC). Outre, la substitution du sable de rivière par le sable de dune provoque une

chute de toutes les propriétés autoplaçantes même avec des dosages élevés en superplastifiant (1.6%). Pour les combinaisons de sable de rivière avec le sable de dune en teneurs élevées ($SD > 30\%$), des ajustements de formulation sont nécessaires pour atteindre les critères autoplaçants, en ajoutant par exemple une quantité d'eau supplémentaire. Également, l'ajout de sable de dune au sable de carrière diminue la fluidité (étalement) et augmente la viscosité (temps d'écoulement) avec des combinaisons optimales respectivement de (15%SD+85%SC) et (30%SD+70%SC).

Selon le travail précédant de [Bouziani & al.], l'augmentation des proportions des sables de carrière et de dune avec le sable de rivière, en tant que systèmes binaires ou ternaires, améliore la fluidité et la capacité de passage à travers les barres de l'essai de J-Ring. Ainsi, la fluidité, mesurée par le J-Ring, peut être améliorée par l'incorporation des sables de carrière et de dune dans les combinaisons binaires (SR+SC) et (SR+SD). En plus, la capacité de passage, mesurée par le temps d'étalement T_{500} , augmente par l'augmentation de dosage de sable de carrière dans le mélange (SR+SD) et diminue par l'augmentation de dosage de sable de dune dans le mélange (SR+SC).

D'après une autre étude de [Bouziani], lorsque les exigences de la fluidité sont combinées (étalement au cône d'Abrams et temps d'écoulement à l'entonnoir en V), les teneurs des sables, dans les combinaisons binaires ou ternaires, doivent être ($SD < 0.24$) et le ($SC < 0.65$). En plus, la capacité de remplissage à la boîte en L est satisfaite lorsque les teneurs de sable de carrière sont ($SC > 0.3$) et ($SC > 0.65$) dans les combinaisons (SC+SR) et (SC+SD) respectivement. Enfin, la stabilité au tamis du BAP est satisfaite lorsque les teneurs de sable de carrière sont ($SC > 0.5$) et ($SC > 0.2$), dans les mêmes combinaisons.

De la même manière, [Benabed & al.] a étudié les propriétés du mortier autoplaçant (MAP) fabriqué avec trois combinaisons de sables ; (SC+SR), (SC+SD) et (SC+SR+SD). Ils ont conclu que les propriétés rhéologiques, en termes de l'étalement, le temps d'écoulement et la viscosité, sont satisfaites avec les combinaisons contenant les sables de carrière et de rivière. Par contre, ces propriétés sont diminuées avec l'utilisation de sable de dune, et particulièrement pour des teneurs élevées ($SD \leq 50\%$). Ceci est dû à la finesse du sable de dune qui nécessite une forte demande en eau et une plus grande quantité de ciment que le sable de carrière ou de rivière afin d'obtenir une fluidité élevée. Par ailleurs, le sable de carrière ayant 10 à 15% des fines, peut produire avec succès un MAP de bonnes propriétés rhéologiques.

2.3.1.3 Effets de combinaison des sables sur les résistances mécaniques

D'après [Rmili], le sable de carrière augmente les résistances à la compression et à la traction quel que soit l'âge du BAP, tandis que le sable de dune diminue ces résistances. En effet, l'amélioration de la résistance à la compression résulte de l'abondance des grains concassés, de l'angularité et de la grande taille de sable de carrière [Lecomte & al.]. Par ailleurs, l'amélioration de la résistance à la traction résulte de la bonne adhérence de la pâte avec les grains concassés et à la nature identique de sable de carrière et de filler calcaire [Ahour]. Les résultats de [Bouziani] indiquent également que les résistances à la compression à 2, 7 et 28 jours augmentent avec l'augmentation de la teneur en sable de carrière, tandis qu'elles diminuent avec l'augmentation de la proportion en sable de dune, dans toutes les combinaisons binaires et ternaires.

Dans le MAP, la combinaison des sables de carrière et de rivière, en binaires ou en ternaires avec le sable de dune, améliorent fortement la résistance à la compression. Cependant, une diminution de cette résistance a été enregistrée avec l'augmentation de la teneur en sable de dune. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur des fines de calcaire jusqu'à 10 à 15% dans le sable de carrière améliore la résistance à la compression, mais pour des teneurs plus élevées, la résistance à la compression diminue progressivement [Benabed & al.].

2.4 Incorporation des additions minérales

Les additions minérales (AM) sont des fines, d'origines naturelles ou artificielles, ajoutées aux matériaux cimentaires (ciment, coulis, mortier ou béton) afin d'améliorer certaines de leurs propriétés. Ayant souvent une finesse comparable à celle de ciment, voire beaucoup plus grande, et une réactivité plus ou moins importante ou non en présence du ciment, les additions minérales peuvent réagir comme filler quasiment inertes, liant pouzzolanique, liant hydraulique latent, ou même sous forme du liant hydraulique. Ces additions ont des effets significatifs sur les matériaux cimentaires aussi bien à leur état frais qu'à leur état durci. Elles peuvent intervenir en trois actions ; effet physique granulaire de remplissage, effet physico-chimique microstructural et effet chimique du liant [Bessa-Badreddine].

Les additions minérales les plus utilisées dans la littérature sont ; le filler calcaire, le laitier granulé de haut fourneau, la cendre volante, la fumée de silice, la poudre de marbre, la poudre de verre, la pouzzolane naturelle, le filler siliceux, le métakaolin, le sédiment de dragage, le schiste calciné et autres.

Du fait que la plupart des additions minérales sont des sous-produits industriels ou des résidus, leur utilisation dans la fabrication du béton peut réduire son coût et limiter son impact environnemental. En plus, ces additions peuvent abaisser la chaleur d'hydratation susceptible d'apparaître des fissures thermiques. Elles permettent, également à l'état frais, de limiter les frictions entre les grains et d'améliorer la compacité du squelette granulaire en remplissant les vides intergranulaires et en libérant l'eau habituellement contenue dans ces vides. Cet arrangement favorable conduit, soit à l'amélioration de la maniabilité à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une maniabilité donnée [Bessa-Badreddine]. Certaines additions minérales peuvent améliorer les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton par son caractère liant. Elles peuvent également avoir des effets bénéfiques sur la zone de transition interfaciale (ITZ) entre la pâte-granulats et la morphologie des hydrates dans le béton [Gao & al.].

2.4.1 Valorisation des additions minérales locales

L'un des inconvénients de BAPHP est son coût dû à l'utilisation des dosages élevés en ciment et en superplastifiant et à l'incorporation éventuelle de la fumée de silice et de l'agent de viscosité. C'est pourquoi, une alternative pour réduire son coût est d'ajouter une quantité importante des additions minérales, sauf bien sûr la fumée de silice, en remplaçant une partie du ciment Portland. La combinaison de deux ou plus de différents types d'additions minérales dans le liant du BAP permet de réduire le dosage en superplastifiant et d'éliminer souvent le besoin en fumée de silice et en agent de viscosité. L'effet bénéfique des additions minérales sur la réduction de la chaleur d'hydratation dans le BAP a été validé à grande échelle [Assaad & Khayat].

Les séquences suivantes se focalisent précisément sur les additions minérales qui seront valorisées dans notre étude expérimentale ; le filler calcaire, la pouzzolane naturelle et le laitier granulé.

2.4.1.1 Filler calcaire

Le filler calcaire (FC) est un sous-produit obtenu par broyage et tamisage des roches calcaires naturelles présentant une teneur massique en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 63%. Selon les normes [NF EN 206/CN] et [NF EN 12620+AI], les additions calcaires sont classées en type I comme addition quasiment inertes, dont le tamisât au 63 μm et la surface de Blaine doivent être supérieurs respectivement à 63% et 2000 cm^2/g .

Le filler calcaire est non seulement une addition de remplissage, mais il présente aussi certaines propriétés hydrauliques qui ne sont désavantageuses, de même qu'il accélère les réactions d'hydratation du ciment et réagit avec certains composés développés au cours de cette hydratation [Cyr & al.] [Hawkins & al.] [Neville]. Préféré par les formulateurs du BAP, le filler calcaire, quel que soit son type, est employé à des quantités importantes en tant qu'addition minérale fiable, mais à condition de vérifier la compatibilité avec le ciment et le superplastifiant utilisés [Diederich] [Zhu & Gibbs]. D'après la littérature, les effets de filler calcaire sur les performances du BAP et du MAP aux états frais et durci sont comme suit ;

À l'état frais : Quand il est finement broyé, le filler calcaire, peut compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, ce qui permet d'améliorer la maniabilité ou de réduire la quantité d'eau requise pour obtenir une maniabilité donnée. Cependant, les résultats des études de l'effet de filler calcaire sur la maniabilité sont très divergents et parfois même contradictoires. Dans le BAP, [Zhu & Gibbs] ont montré que le dosage approprié en superplastifiant dépend davantage du type que de la finesse de filler calcaire utilisé. Ainsi, ils ont constaté que le ciment Portland demande plus du superplastifiant que les différents types de filler calcaire. Par contre, [El Hilali] a révélé que le point de saturation du superplastifiant et la maniabilité sont beaucoup plus affectés par la finesse que par la composition chimique de filler calcaire. Dans le MAP, [Yahia & al.] ont affirmé que pour un rapport E/C et un dosage en superplastifiant donnés, l'ajout de filler calcaire n'affecte pas la fluidité jusqu'à un dosage critique, mais [Sahmaran & al.] ont prétendu que l'incorporation de filler calcaire augmente significativement la maniabilité. En résumé, l'effet de filler calcaire s'oriente vers un fluidifiant qui peut diminuer la viscosité plastique et augmenter le seuil de cisaillement [Kwan & Ling].

À l'état durci : L'influence de l'ajout de filler calcaire sur les propriétés mécaniques est manifeste. En effet, son utilisation dans le BAP génère une accélération des résistances au jeune âge et notamment lorsqu'il est très fin (surface de Blaine $\geq 409 \text{ m}^2/\text{kg}$). La résistance à la compression passe de l'ordre de 30 MPa à 3 jours à 60 MPa à 28 jours et peut aller jusqu'à 78 MPa en 5 mois, ce qui conduit au BAPHP de résistance à la compression et de rigidité plus élevées [El Hilali]. D'après [Zhu & Gibbs], la résistance à la compression de BAP contenant différents types de filler calcaire est significativement plus élevée que celle du BO au même rapport E/C. Cette résistance aux cubes est supérieure de 60 à 80% à 7 jours et de 30 à 40% plus élevées à 28 jours. Dans le MAP, [Sahmaran & al.] ont conclu que l'ajout de filler calcaire en substituant une quantité du ciment peut réduire les résistances à la compression à 28 et à 56 jours.

2.4.1.2 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle (PN) est des substances finement broyées d'origine de roches volcaniques basaltiques ou même de roches sédimentaires. Elle est essentiellement composée siliceuse ou silico-alumineuse contenant 60 à 85% de silice réactive SiO_2 et le reste d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde de fer. La pouzzolane ne possède pas des propriétés liantes hydrauliques intrinsèques, mais en présence d'eau, elle peut réagir à température ordinaire avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, libéré par le clinker au cours de son hydratation, pour former également des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les additions minérales qui, par le même processus que la pouzzolane naturelle, conduisent également à la formation des propriétés liantes stables sont réputés avoir de caractère pouzzolanique de de type II selon la norme [NF EN 15167-1]. La réaction pouzzolanique consomme de la portlandite contrairement à l'hydratation du clinker qui en libère.

Bien qu'elle soit reconnue comme la plus ancienne addition minérale, les études qui valorisent l'utilisation de pouzzolane naturelle dans le BAP et notamment BAPHP sont rares. Récemment, plusieurs chercheurs Algériens se sont penchés vers la valorisation de la PN de la région de Béni Saf dans le BAP [Nécira] [Belaidi & al.] [Belaribi] [Omrane & al.]. Grâce à ses diverses propriétés, la PN permet lorsqu'elle est bien proportionnée, de garder la maniabilité du BAP, d'augmenter ses résistances mécaniques à long terme et d'améliorer notamment sa durabilité. Ses effets sur la maniabilité, les résistances mécaniques et la durabilité du BAP sont présentés comme suit :

À l'état frais : Lorsque la pouzzolane est finement broyée (finesse de 400 à 420 m²/kg), son incorporation jusqu'à 15% du ciment permet de garder les critères de la maniabilité du BAP. Cependant, cette maniabilité est considérablement affectée à des dosages élevés en pouzzolane (> 15%). L'ajout de pouzzolane augmente le temps d'écoulement à l'entonnoir et peut même arrêter cet écoulement [Belaidi & al.] [Omrane & al.]. Dans le MAP, [Belaribi] a trouvé que la maniabilité diminue avec l'augmentation des teneurs en pouzzolane. Pour garder une même maniabilité, la pouzzolane nécessite plus de superplastifiant que le ciment seul.

À l'état durci : Les résistances à la compression à tous les âges diminuent avec l'ajout de la pouzzolane. Cependant, une légère augmentation de la résistance à long terme (120 jours) est obtenue pour une teneur plus élevée de 15% en pouzzolane [Omrane & al.]. Pour le MAP contenant de 20 à 30% de pouzzolane, l'amélioration de la résistance est remarquable à partir de 60 jours. L'effet le plus notable de la pouzzolane est d'améliorer la densité de la matrice de pâte qui sera plus résistante aux eaux agressives et permettront une fixation progressive des alcalis du ciment. L'incorporation de pouzzolane dans le BAP a un effet bénéfique approuvé sur sa durabilité [Omrane & al.] [Belaribi].

2.4.1.3 Laitier granulé

Le laitier granulé de hauts fourneaux LG, coproduit de l'industrie de la sidérurgie, est obtenu par broyage de la scorie fondue brusquement refroidie par trempe à l'eau. Il se présente sous forme moulue et se caractérise majoritairement par une phase vitreuse amorphe de de l'ordre de 90% et le reste par phase des germes cristallisés. Sa composition chimique comporte pratiquement les mêmes oxydes que ceux du clinker ; la chaux CaO de l'ordre de 35 à 48%, la silice SiO₂ entre 32 et 41%, l'alumine Al₂O₃ de 9 à 18%, la magnésie de 1 à 9%, et d'autres oxydes en très faibles quantités [Houzé].

Selon les normes [NF EN 206/CN], [NF EN 15167-1] et [NF EN 15167-2], le laitier vitrifié moulu de haut fourneau est une addition de type II à cratère hydraulique latent. En effet, le laitier possède une réactivité à l'eau caractérisée par une cinétique très lente, de l'ordre de plusieurs mois, mais il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour déclencher son hydratations comme un véritable ciment. Cette prise hydraulique peut être activée de plusieurs façons ; thermique, chimique, ou combinée. Elle se produit très progressivement

et permet d'obtenir des hydrates C-S-H stables qui constituent la prise et le durcissement du laitier et s'accompagne du développement progressif des résistances mécaniques.

Les effets du laitier sur les propriétés du BAP frais et durci sont résumés comme suit ;

À l'état frais : Le laitier peut servir comme des fines réactives induisant des bétons à faible chaleur d'hydratation [Niknezhad]. L'incorporation de laitier à des teneurs modérées (moins de 45% de liant) peut améliorer tous les paramètres de la maniabilité [Ali-Boucetta]. La quantité de laitier dans le BAPHP destiné aux ouvrages sous l'eau peut atteindre 50% de liant [Sonebi]. La distribution granulométrique plus large de laitier peut assurer une meilleure distribution des grains de ciment, de même que la surface plus lisse de ses grains peut absorber un peu d'eau lors du malaxage. Lorsque le laitier est broyé à une grande finesse, le ressuage du béton est diminué. Le laitier demande plus d'eau et du superplastifiant qu'une addition quasiment inerte comme le filler calcaire pour une même fluidité, ceci est dû à sa morphologie qui se caractérise par des arrêtes franches. En plus, le laitier possède un caractère réactif et présente un écoulement lié à deux composantes ; physico-chimique et frottement granulaire [Toutou]. Également, le laitier a l'aptitude d'adsorber les molécules du superplastifiant [Shi & al.¹].

À l'état durci : La présence de laitier dans le BAP conduit à une diminution des résistances mécaniques au jeune âge, mais elles continuent de croître de façon significative au-delà de 28 jours. Le laitier ayant une cinétique de durcissement lente, c'est pourquoi ses résistances à la compression à 7 j sont plus faibles que celles de ciment ou de filler calcaire. Grâce à son potentiel hydraulique latent, le laitier continue de gagner des résistances à long terme beaucoup plus importantes que celles de ciment ou de filler calcaire. En plus, ses petites particules ($\leq 10 \mu\text{m}$) contribuent aux résistances au jeune âge tandis que ses plus grosses particules ($\geq 45 \mu\text{m}$) accroissent les résistances à plus longues échéances. Le BAP de laitier conservé humide présente de très fortes résistances finales. Pour obtenir les résistances du BAPHP, le laitier doit être correctement proportionné (≥ 60 du liant) [Dinakar]. Le BAP contenant le laitier résiste bien aux eaux agressives surtout en immersion complète. La bonne résistance chimique est liée à la faible teneur en chaux et à la forte compacité des hydrates formés.

2.4.2 Facteur d'efficacité des additions minérales

Pour spécifier les règles de l'incorporation des additions minérales en substituant partiellement le ciment dans le béton ou mortier, le nouveau liant, composé de ciment et d'addition ($C + AM$), doit être comparé au ciment initial C_0 , en déterminant notamment la contribution d'addition à l'activité liante. Cette comparaison se fait généralement par le facteur d'efficacité k qui quantifie le dosage efficace en addition minérale capable de faire l'activité liante (réactivité hydraulique ou pouzzolanique), au même titre que le ciment.

Le facteur k est donné par le rapport de dosage en ciment équivalent C_{eq} à sa substitution par le dosage en addition AM qui assure la conservation des performances ;

$$k = \frac{C_{eq}}{AM}$$

Le ciment équivalent C_{eq} sera donc ajouté au dosage réel utilisée en ciment C pour former le liant équivalent ;

$$L_{eq} = C + C_{eq} = C + k AM$$

Le dosage en addition minérale est défini par le rapport $AM/(C + AM)$ et la teneur équivalente en eau est donnée par le rapport $E_{eq}/(C + k AM)$ en remplaçant le rapport initial E_0/C_0 .

En pratique, le facteur k est évalué expérimentalement à l'aide de l'indice d'activité i qui est défini en terme du rapport entre la résistance à la compression $Rc(p)$ du mortier ou béton contenant un dosage donné p en addition minérale en substituant le ciment et la résistance à la compression $Rc(0)$ du mortier ou béton témoin sans addition ;

$$i(p) = \frac{Rc(p)}{Rc(0)}$$

Le facteur k dépend de plusieurs paramètres, à savoir ; le dosage, le type et la finesse de l'addition, le type du ciment, ainsi que l'âge et l'environnement de béton. La classe de l'activité liante de l'addition est estimée par les valeurs de k (Fig. 3.3). Par exemple, l'addition est équivalente au ciment lorsque $k = 1$ et elle est inerte lorsque $k = 0$.

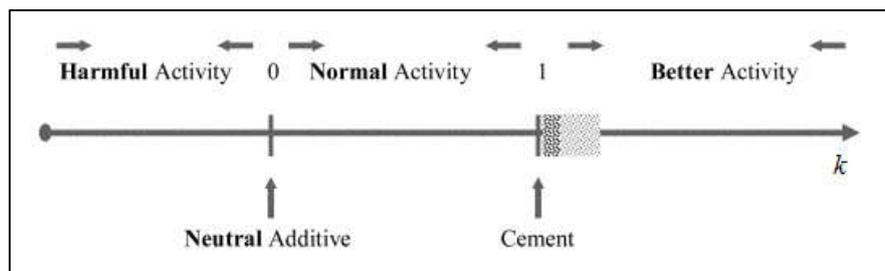


Figure 3.3 : Classes d'activité en fonction du facteur d'efficacité [Boukhatem & al.]

D'après une étude synthèse de [Domone²] sur le BAP, le filler calcaire, ayant des dosages de 15 à 55% de liant, possède des valeurs de k de 0.22, 0.36 et 0.29 pour les échéances de 1, 7 et 28 jours respectivement. En plus, le laitier granulé, ayant des dosages de 20 à 60% de liant, possède une valeur de k de 0.57 à 28 jours. Dans la méthode de formulation de BAP à base de laitier granulé, [Dinakar & al.] ont proposé le facteur d'efficacité obtenu par [Babu & Kumar] dans le BO. Il a pour valeurs à 28 jours de 1.28 à 0.70 correspondants aux dosages de laitier de 10 à 80% respectivement.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a été élaboré pour faire les points sur les connaissances relatives aux influences de l'incorporation de différents types de sables et additions minérales sur les paramètres de la maniabilité et les résistances mécaniques sur le BAP et particulièrement le BAPHP à l'état frais et durci.

La synthèse bibliographique montre qu'il y a un manque de données publiées sur les effets de ces matériaux sur le comportement rhéologique et mécanique du BAPHP. De même, les données disponibles dans la littérature restent encore divergentes, c'est pourquoi la faisabilité de sable de carrière, sable de dune, filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé, dans le BAPHP n'est pas encore validée.

- **Concernant les Sables :** L'incorporation totale ou partielle de sable de carrière ou sable de dune, en remplaçant le sable de rivière, est possible dans la composition du BAP. La combinaison de différents types de sables, ayant de formes et de granularités variables, permet de mieux arranger l'empilement granulaire et d'augmenter la compacité. Le sable de carrière, ayant une forme anguleuse et contenant une teneur élevée en fines calcaires, pourrait diminuer les propriétés de la maniabilité du BAP,

mais tout en améliorant les résistances mécaniques. Le sable de dune, ayant une quantité très élevée des fines roulées siliceuses, pourrait altérer le comportement du BAP aux états frais et durci, mais son utilisation en proportions bien déterminées est faisable. Plusieurs chercheurs ont valorisé l'utilisation des sables de carrière et de dune dans les BO et BAP. Néanmoins. Il n'existe pas à l'heure actuelle des études qui traitent la substitution du sable de rivière par le sable de carrière ou de dune dans le BAPHP.

- **Concernant les additions minérales :** Plusieurs types d'additions minérales, à des dosages très élevés, peuvent être utilisés dans le BAPHP afin de modifier et d'améliorer certaines de ces propriétés rhéologiques ou mécaniques. Les fines des additions minérales permettent, par l'effet physique granulaire favorable, de remplir la porosité de la matrice cimentaire, ce qui favorise soit la maniabilité par augmentation de la fluidité et limitation du risque de la ségrégation, soit les résistances à court terme par la réduction du besoin en eau. Ainsi, Ces fines sont susceptibles, par l'effet éventuellement microstructural ou chimique, de modifier le processus d'hydratation du ciment et la structuration des hydrates, ou de réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés (liant hydraulique latent ou liant pouzzolanique). Cela permet d'améliorer particulièrement les résistances mécaniques à long terme et la durabilité.

CHAPITRE 4 :

MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS

4.1 Introduction

L'emploi judicieux des matériaux de construction exige la préconnaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, afin d'obtenir le meilleur choix répondant à leur destination. Les informations concernant les matériaux utilisés doivent être récoltées par des techniques fiables tout en préférant les essais normalisés. En plus, il est nécessaire que les matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène possédant par conséquent des propriétés uniformes. Par ailleurs, il faut choisir des essais adéquats pour parvenir à un meilleur contrôle des propriétés rhéologiques et mécaniques des formulations confectionnées.

Les points précédents doivent être donc clarifiés avant de présenter les résultats obtenus. Pour cela, ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser nos mélanges cimentaires, pâtes, mortiers et bétons, à l'état frais et durci.

Ajoutons enfin que la caractérisation physique et mécaniques des matériaux est réalisée dans le Laboratoire de la Cimenterie de Lafarge à Hammam Dalâa à M'sila, tandis que la leur caractérisation chimique est effectuée dans le Laboratoire des Matériaux du Centre de Réacteur Nucléaire d'Aïn Oussara à Djelfa. Ainsi, la présente étude expérimentale s'est déroulée au sein de Laboratoire de Génie Civil de l'Université de Djelfa.

4.2 Matériaux utilisés

4.2.1 Gravieres

Deux classes granulaire de graviers concassés, GC 3/8 et GC 8/15, ont été utilisées pour toutes les formulations du béton. Il s'agit des roches calcaires concassées ramenées de la

carrière de Zakar à Djelfa. Les propriétés physiques et les analyses granulométriques des graviers sont représentées respectivement dans le Tab. 4.1 et la Fig. 4.1.

Bien que les graviers roulés soient recommandés pour la formulation du BAP sur le plan de la maniabilité, nous avons choisi les graviers concassés afin de favoriser les résistances mécaniques.

Tableau 4.1 : Propriétés physiques des graviers

Graviers	GC 3/8	GC 8/15
Densité apparente	1.348	1.345
Densité absolue	2.60	2.60
Compacité lâche (%)	51.85	51.73
Compacité serrée (%)	58.60	57.40
Degré d'absorption (%)	0.41	0.41
Los Angeles (%)	23	23
Observation	durs	durs

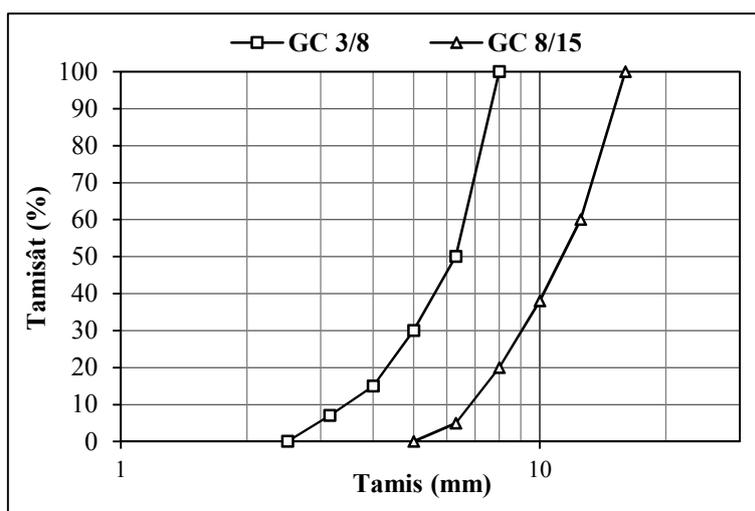


Figure 4.1 : Analyse granulométrique des graviers

4.2.2 Sables

Nous avons utilisé trois types de sables de différentes origines, formes, textures, granulométries, finesses, natures minéralogiques et compositions chimiques. Il s'agit de sable de rivière, sable de carrière et sable de dune, qui sont tous proviennent de la Wilaya de Djelfa.

Les combinaisons binaires de ces sables permettent d'étudier leurs effets sur les propriétés du BAPHP.

A. Sable de rivière (SR 0/3) : C'est un sable roulé siliceux d'origine alluvionnaire. Il est issu des roches meubles de la sablière de la rivière de Djelfa. Il est considéré moyen de classe granulaire 0/3 continue et étalée.

B. Sable de carrière (SC 0/3) : C'est un sable concassé des roches calcaires provenant comme coproduit de la carrière de Zakar. Il est considéré peu moyen de classe granulaire 0/3 continue et assez étalée.

C. Sable de dune (SD 0/0.63) : C'est un sable roulé purement siliceux d'origine éolienne. Il est ramené de désert de Sidi Baizid où se trouve en abondance. Il est considéré très fin de classe granulaire 0/0.63 très serrée et monogranulaire.

Les combinaisons binaires de ces sables permettent d'étudier, dans le chapitre 4, leurs effets sur les propriétés du BAPHP. En effet, le sable de dune possède des grains plus petits, et particulièrement leur diamètre maximal, que ceux des sables de rivière et de carrière. Ce pendent, le diamètre maximal du sable de dune ne dépasse pas généralement 1 mm, et dans notre cas $D = 0.63$ mm. Il vaut mieux donc le garder tel qu'il est dans l'étude afin de conserver l'effet de la granulométrie des sables.

Les propriétés physiques, les analyses granulométriques et les analyses de diffractomètre des rayons X (DRX) des sables de rivière, de carrière et de dune sont données respectivement dans le Tab. 4.2 et la Fig. 4.2. & 4.3.

Tableau 4.2 : Propriétés physiques des sables

Sables	SR 0/3	SC 0/3	SD 0/0.63
Densité apparente	1.439	1.411	1.447
Densité absolue	2.54	2.60	2.58
Compacité lâche (%)	56.65	54.27	56.09
Compacité serrée (%)	65.60	63.10	64.30
Degré d'absorption (%)	0,32	0,35	1.69
Teneur en fines < 80 μm (%)	3.20	7.10	12.00
Module de finesse	2.64	2.39	0.78
Équivalent de sable (%)	77	76	79
Observation	moyen	peu moyen	très fin

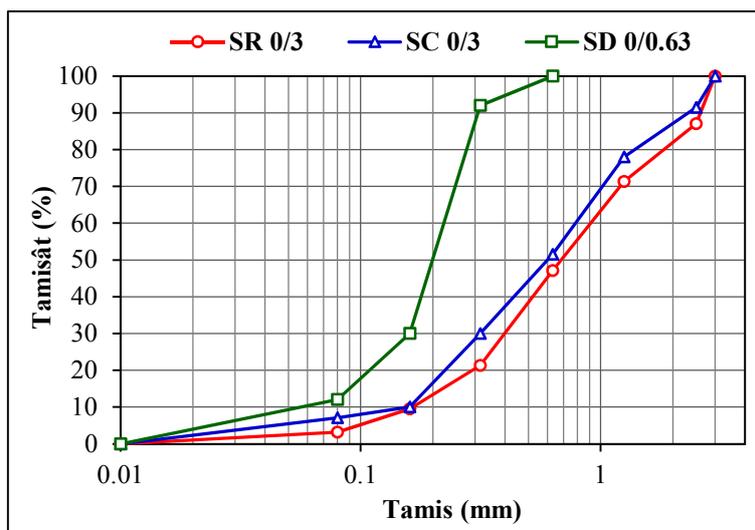


Figure 4.2 : Analyse granulométrique des sables

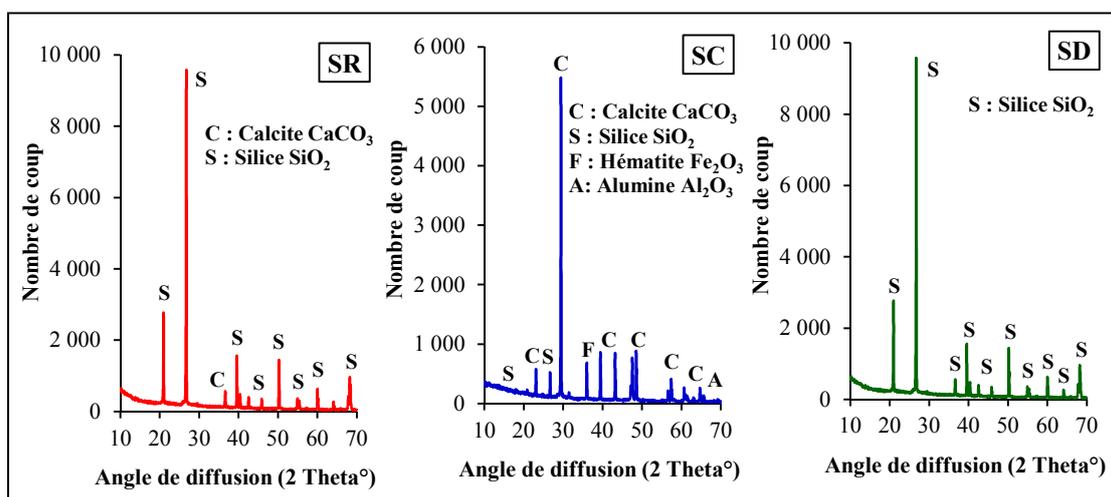


Figure 4.3 : Analyse de diffractomètre des rayons X (DRX) des sables

4.2.3 Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour confectionner tous les mélanges cimentaires, pâte, mortier et béton. Il s'agit d'un ciment Portland CEM I 42.5 N - SR 3 provenant de la cimenterie de Lafarge de Hammam Dalâa à M'sila, et commercialisé sous le nom Mokaouem Plus.

Ce type de ciment, constituant 95% de clinker et 5% de gypse, a été choisi pour la simple raison qu'il ne contient pas d'additions minérales, ce qui permet donc de bien apprécier et contrôler la nature du liant et les quantités réelles des additions minérale à introduire dans ce liant.

D'après le producteur, ce ciment est adapté aux travaux en milieux agressifs et résiste bien aux sulfates. La qualité de ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude puisqu'il provient d'une unique livraison.

Les principales propriétés et compositions du ciment sont données par les Tabs. 4.3 & 4.4 & 4.5 & 4.6 et les Figs. 4.4 & 4.5.

Tableau 4.3 : Propriétés physiques du ciment

Densité apparente	1.13	Consistance normale (% H ₂ O)	27.20
		Début de prise (min)	172
Densité absolue	3.10	Fin de prise (min)	271
		Expansion à chaud (mm)	0.50
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3917	Coefficient de saturation en chaux	0.966
		Chaleur d'hydratation (joules/g)	271

Tableau 4.4 : Résistances caractéristiques du ciment

Échéance (jours)	2	7	28	90
Résistance à la compression (MPa)	22.9	34.8	51.0	57.7
Résistance à la traction par flexion (MPa)	4.8	6.6	8.7	9.0

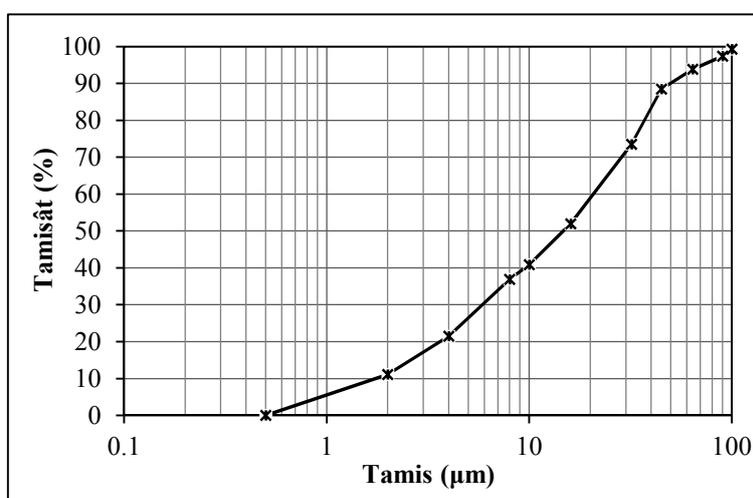


Figure 4.4 : Analyse granulométrique à laser du ciment

Tableau 4.5 : Composition chimique du ciment

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	PAF
Teneur (%)	21.36	4.98	3.63	65.86	2.06	0.93	0.08	0.77	0.02	2.48

Tableau 4.6 : Composition minéralogique du ciment

Élément	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	61.54	14.83	7.04	11.05

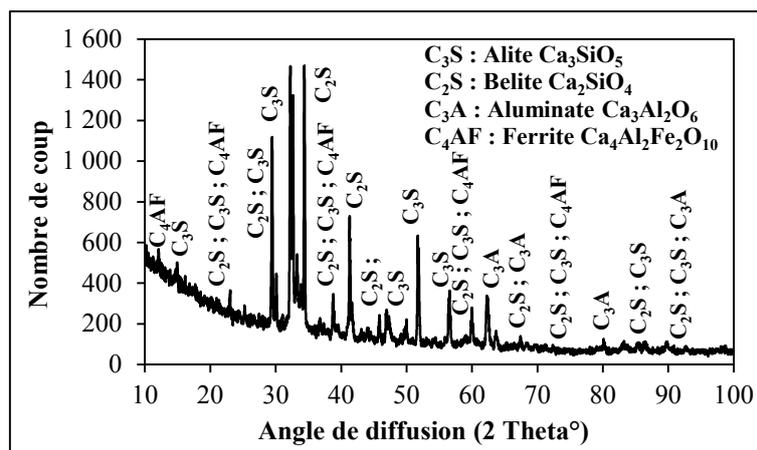


Figure 4.5 : Analyse de diffractomètre des rayons X (DRX) du ciment

4.2.4 Additions minérales

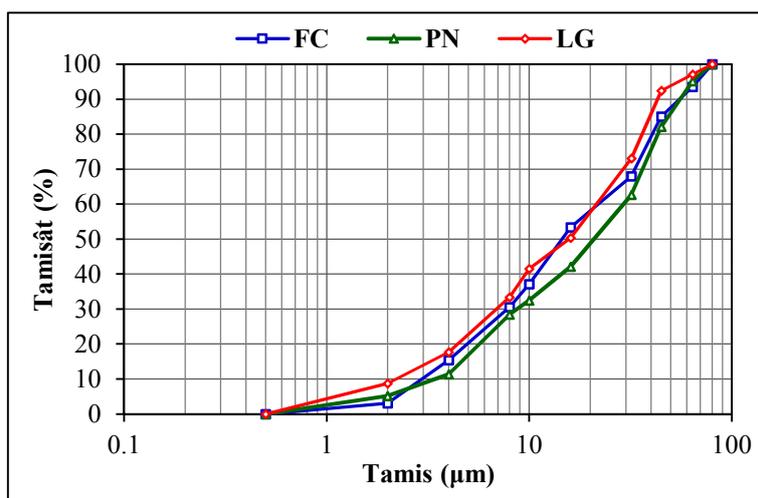
Nous avons utilisé trois types d'additions minérales à caractères différents et provenant de plusieurs régions de l'Algérie. Il s'agit des ajouts disponibles comme gisements naturels ou coproduits industriels ; filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé. Afin de donner à l'étude un aspect économique, nous avons choisi une finesse pour toutes les additions plus faible que celle du ciment. En effet, les additions sont broyées et passées au tamis de 80 μm afin d'obtenir une surface spécifique de Blaine de l'ordre de $3200 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le détail de ces additions est présenté comme suit :

- A. Filler calcaire (FC) :** Ce sont des roches calcaires concassées, provenant de plusieurs carrières de Foughala à Biskra. Il est composé essentiellement de calcite cristallisée de l'ordre de 55% et ses grains sont caractérisés par des arêtes obliques.
- B. Pouzzolane naturelle (PN) :** Ce sont des pierres ponce et scories concassées d'origine volcanique, extrayant du gisement naturel de Beni Saf à Aïn Témouchent. Elle est composée essentiellement de silice amorphe réactive de l'ordre de 45% et ses grains sont caractérisés par des arêtes plus ou moins franches.
- C. Laitier granulé (LG) :** C'est un coproduit moulu de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, provenant du complexe sidérurgique d'El-Hadjar à Annaba. Il est composé principalement par une phase vitreuse amorphe de l'ordre de 85% et ses grains sont caractérisés par des arêtes franches.

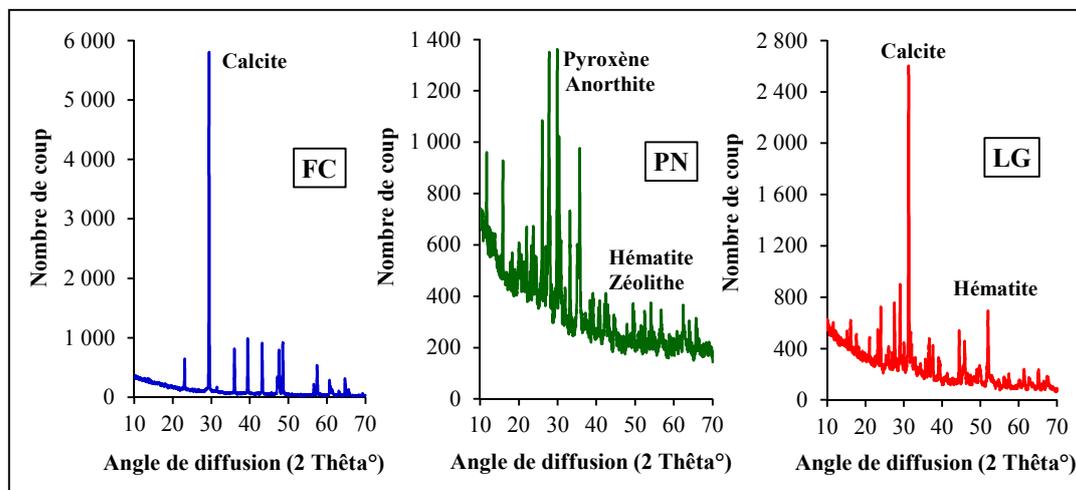
Les principales propriétés et compositions des additions minérales sont données par les Tabs. 4.7 & 4.8 et les Figs. 4.6 & 4.7.

Tableau 4.7 : Propriétés physiques des additions minérales

Additions minérales	FC	PN	LG
Densité apparente	1.09	1.15	1.15
Densité absolue	2.50	2.73	2.78
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3200 ± 50	3150 ± 50	3250 ± 50
Taux de verre (%)	–	19	85
Résistance mécanique des fines (MPa)	4.10	3.20	4.60


Figure 4.6 : Analyse granulométrique à laser des additions minérales
Tableau 4.8 : Composition chimique des additions minérales

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.A.F.
FC (%)	–	–	0.03	55.50	0.80	–	–	–	43.60
PN (%)	46.10	17.20	10.50	10.10	4.00	–	2.80	1.60	4.80
LG (%)	41.30	5.50	3.80	42.60	4.10	0.90	–	–	0.50


Figure 4.7 : Analyse de diffractomètre des rayons X (DRX) des additions minérales

4.2.5 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un polymère à base d'acide de polycarboxylates sous forme liquide jaunâtre et commercialisé sous le nom Medaflow 30 par la société Granitex. Il est utilisé soit comme haut réducteur d'eau soit comme hyperfluidifiant en répondant à la norme [NF EN 934-2+AI].

Le superplastifiant est concentré en particules solides de 30% et ayant une densité absolue en liquide de 1.07, une densité absolue en extrait sec de 1.23 et de pH de 6.5.

Ajoutons que, pour des raisons de confidentialité, le producteur ne fournit pas la composition chimique de cet adjuvant.

4.2.6 Eau de gâchage

C'est l'eau potable du robinet de l'Universités de Djelfa. Bien qu'elle contienne peu de sulfate, nous supposons que sa qualité répond à toutes les prescriptions de la norme [NF EN 1008] en matière de béton. Sa température est comprise entre 19 et 21 °C.

4.3 Essais réalisés

L'étude expérimentale comporte quatre volets d'essais ;

- Les essais des compacités lâches et serrées sur sables et graviers, ainsi que l'essai de la compacité sur bétons frais.
- Les essais sur pâtes fraîches et sur mortiers frais et durcis ; étalement de pâte au mini-cône de Kantro, étalement de mortier au mini-cône de Haegermann, écoulement de mortier au mini-entonnoir et résistance à la compression de mortier.
- Les essais sur bétons à l'état frais ; étalement au cône d'Abrams, écoulement à la boîte LCPC, capacité de remplissage à la boîte en L et la stabilité au tamis.
- Les essais sur bétons à l'état durci ; résistances à la compression et résistances à la traction par flexion.

4.3.1 Essais des Compacités

4.3.1.1 Compacité lâche des granulats

L'essai de la compacité lâche consiste à remplir une éprouvette cylindrique, en acier indéformable de volume 5 litres (\varnothing 16.5 cm ; H 23.385 cm), par simple versement d'un échantillon constituant des graviers ou des sables (Pho. 4.1). Ensuite, l'échantillon est pesé pour estimer la masse volumique apparente lâche ρ_l , qui permet, avec la masse volumique absolue ρ_a , d'en calculer la compacité lâche c_l des granulats par la formule suivante :

$$c_l = \frac{\rho_l}{\rho_a} = \frac{V_a}{V_l}$$

Où : V_a est le volume absolu de l'échantillon des granulats et V_l est le volume apparent de l'échantillon lâchement empilé, qui égale le volume de l'éprouvette de 5 litres.

Cet essai est inspiré de l'essai de la norme [NF EN 1097-3] pour déterminer la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire, mais le volume de son éprouvette est plus grand et donc plus représentatif. Les résultats obtenus représentent la moyenne de trois échantillons et l'homogénéisation des granulats est effectuée manuellement.



Photo 4.1 : Essai de la compacité lâche des granulats (graviers et sable)

4.3.1.2 Compacité serrée des granulats

L'essai de la compacité serrée vise à déterminer la compacité des granulats, graviers ou sables, lorsqu'ils sont soumis à un mode de serrage donné dans un récipient. Il consiste à utiliser la même éprouvette cylindrique précédente de la compacité lâche, remplissant par le même échantillon des granulats, puis à mettre un piston cylindrique coulissant sur cet

échantillon correspondant à une contrainte de 9.47 kPa et à appliquer à l'ensemble des vibrations mécaniques de 3 min à l'aide d'une table vibrante (Pho. 4.2). Ce mode serrage engendre un réarrangement des grains et en résulte donc un compactage de l'échantillon. À la fin, la profondeur à vide de compactage est mesurée, ce qui sert à estimer le volume apparent serré V_s et la masse volumique apparente serrée ρ_s de l'échantillon. La compacité serrée c_s est donnée par la formule suivante ;

$$c_s = \frac{\rho_s}{\rho_a} = \frac{V_a}{V_s}$$

Cet essai est inspiré de l'essai de la compacité des fractions granulaires à la table à secousses, développé au LCPC par [Lédée & al.]. Les résultats obtenus sont les valeurs moyennes de compacité serrées sur trois éprouvettes.



Photo 4.2 : Essai de la compacité serrée des granulats (graviers et sables)

4.3.1.3 Compacité des bétons frais

Par le même principe de la compacité lâche des granulats, l'essai de la compacité du béton à l'état frais consiste à remplir l'éprouvette cylindrique de 5 litre par un échantillon de formulation de béton juste après le malaxage (Pho. 4.3). L'auto-compaction de béton se fait par un coulage manuel sans aucun mode de serrage. L'échantillon de béton est pesé, puis sa masse volumique apparente ρ_b et sa masse volume absolue ρ_a sont estimées. La compacité du béton frais est donnée par la formule suivante ;

$$c_b = \frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{V_a}{V_b}$$

Où : V_a est le volume absolu de l'ensemble des constituants de béton frais (graviers, sables, ciment, additions minérales, eau et superplastifiant) ; et V_b est le volume apparent de l'éprouvette de béton, qui égale 5 litres.



Photo 4.3 : Essai de la compacité des bétons frais

4.3.2 Essais sur pâte et mortier

4.3.2.1 Étalement de pâte au mini-cône de Kantro

La caractérisation des pâtes autoplaçantes (PAP) est effectuée par l'essai de l'étalement au mini-cône de Kantro ayant des dimensions proportionnelles à celles du cône d'Abrams avec un rapport de 0.19 (Pho. 4.4). Le principe de l'essai consiste à remplir le mini-cône et de mesurer l'étalement de la pâte sur une plaque horizontale après soulèvement du mini-cône et l'arrêt de l'écoulement [*Kantro*].

L'étalement SF_p est estimé par la moyenne de deux mesures de diamètres orthogonaux d_1 et d_2 de la galette de pâte. L'étalement relatif Γ_p de la pâte est exprimé en fonction de l'étalement SF_p et le diamètre ($D_0 = 38$ mm) de la base de mini-cône par la relation ;

$$\Gamma_p = \frac{SF_p^2 - D_0^2}{D_0^2} = \left(\frac{SF_p}{38}\right)^2 - 1$$



Photo 4.4 : Essai de mini-cône de Kantro

4.3.2.2 Étalement de mortier au mini-cône de Haegermann

L'essai de l'étalement du mortier a été réalisé à l'aide de mini-cône de Haegermann, qui est recommandé par [*Okamura & al.*] pour caractériser la fluidité dans la méthode de

formulation Japonaise de BAP. Le principe de cet essai est identique à celui de Kantro, mais les dimensions de mini-cône de Haegermann sont plus grandes ; 60 mm de hauteur, 70 mm de diamètre au sommet et 100 mm de diamètre à la base (Pho. 4.5).

L'étalement relatif Γ_m du mortier est donné en fonction de son étalement SF_m et le diamètre de la base de mini-cône par la relation suivante ;

$$\Gamma_m = \frac{SF_m^2 - D_0^2}{D_0^2} = \left(\frac{SF_m}{100}\right)^2 - 1$$



Photo 4.5 : Essai de mini-cône de Haegermann

4.3.2.3 Écoulement de mortier au mini-entonnoir

L'essai de l'écoulement de mortier a été réalisé à l'aide de mini-entonnoir en V, proposé par [Okamura & al.] dans leur méthode Japonaise de formulation de BAP. Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement T_m nécessaire pour vider complètement le mini-entonnoir de 1134 ml de mortier à travers de son orifice (Pho. 4.6). [Okamura & al.] ont proposé la grandeur de la vitesse relative de l'écoulement ($R_m = 1/T_m$) pour estimer la fluidité de mortier, mais dans notre étude, on utilise la grandeur de l'écoulement relatif exprimé en logarithme du temps ; $\text{Log}(T_m)$, avec T_m en sec. En effet, [de Larrard & al.²] ont met en valeur l'intérêt de raisonner en logarithme du temps pour écarter la forme et le volume de récipient du critère de la fluidité de mortier.



Photo 4.6 : Essai de mini entonnoir en V à mortier

4.3.2.4 Résistance à la compression de mortier

Les essais de la résistance à la compression sont effectués par écrasement des éprouvettes cubiques ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) de mortier à l'âge de 28 jours, conformément à la norme [NF EN 196-1]. Les résultats sont obtenus par la moyenne des valeurs de six éprouvettes. La machine utilisée est une presse hydraulique automatique de capacité de 250 kN en compression et de 15 kN en flexion. La mise en charge est asservie par une unité de contrôle avec affichage numérique.

Les éprouvettes de mortier sont confectionnées dans des moules en bois et en aciers sans aucun compactage, et ensuite elles sont couvertes par un film polyane de protection contre la dessiccation pendant 48 heures. Après le démoulage, les éprouvettes sont immergées dans l'eau jusqu'à un jour avant la date d'essai.

4.3.3 Essais sur béton frais

Pour évaluer les paramètres de la maniabilité des bétons frais, nous avons réalisé quatre essais dont trois sont normalisés. Les essais choisis sont largement suffisants pour estimer les critères autoplaçants. Il s'agit de l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte LCPC, la capacité de remplissage à la boîte en L et la stabilité au tamis. Leurs principes sont décrits en détail dans le chapitre 1.

4.3.3.1 Étalement au cône d'Abrams

La fluidité a été évaluée par l'essai de l'étalement au cône d'Abrams (Pho. 4.7) Selon la norme [NF EN 12350-8], le BAPHP doit atteindre un étalement ; $SF \geq 550 \text{ mm}$.

Le temps T_{500} pour atteindre un étalement ($SF = 500 \text{ mm}$) est mesuré dans l'étude des additions minérales, ce qui donne une indication sur la viscosité des bétons. Selon la norme [NF EN 12350-8], le BAP est classé selon deux types ; $VS1 (T_{500} < 2 \text{ sec})$ et $VS1 (T_{500} \geq 2 \text{ sec})$.

4.3.3.2 Écoulement à la boîte LCPC

La fluidité a été également évaluée par l'essai de l'écoulement de la boîte LCPC dans l'étude de l'effet des additions minérales (Pho. 4.8). Cet essai n'est pas encore normalisé, mais il donne, par la mesure de la longueur de l'écoulement FL , une bonne indication sur l'homogénéité de la mobilité de béton frais dans un milieu assez libre.



Photo 4.7 : Déroulement de l'essai de l'étalement au cône d'Abrams



Photo 4.8 : Déroulement de l'essai de la boîte LCPC

4.3.3.3 Boîte en L

La déformabilité a été mesurée par l'essai de la capacité de remplissage à la boîte en L (Pho. 4.9). Selon la norme [NF EN 12350-10], le BAPHP doit atteindre un taux de remplissage ; $PL \geq 0.80$.



Photo 4.9 : Déroulement de l'essai de la boîte en L

4.3.3.4 Stabilité au tamis :

La stabilité a été mesurée par l'essai de la stabilité au tamis (Pho. 4.10). Selon la norme [NF EN 12350-11], le BAPHP doit posséder un indice de ségrégation ; $SR \leq 20\%$.



Photo 4.10 : Déroulement de l'essai de la stabilité au tamis

4.3.4 Essais sur béton durci

Après avoir fini les essais sur bétons frais, les mélanges sont versés sans aucun mode de serrage dans des moules pour confectionner des éprouvettes, selon les normes [NF EN 12390-1] & [NF EN 12390-2], comme suit ;

- éprouvettes cylindriques (\varnothing 160 mm ; H 320 mm) pour réaliser les essais de la compression lors de l'étude des sables (chapitre 5).
- éprouvettes cubiques ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) pour réaliser les essais de la compression lors de l'étude des additions minérales (chapitre 6).
- éprouvettes prismatiques ($100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$) pour réaliser les essais de la flexion lors de l'ensemble des études des sables et des additions minérales.

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures de son coulage et puis sont conservées dans un bac d'eau ayant une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ jusqu'à la date de l'essai.

4.3.4.1 Résistance à la compression

Les essais de la résistance à la compression sont effectués, conformément à les normes [NF EN 12390-3] [NF EN 12390-4], par écrasement des éprouvettes cylindriques et cubiques à différentes échéances 7, 28 et 90 jours. Les résultats sont obtenus par la moyenne de trois éprouvettes testées. La machine utilisée est une presse hydraulique de l'écrasement uni-axial des cylindres, dont la capacité maximale est de 1500 kN en compression.

4.3.4.2 Résistance à la traction par flexion

Les essais de la résistance à la traction par flexion à trois points sont réalisés, conformément à la norme [NF EN 12390-5], par écrasement des éprouvettes prismatiques à l'âge de 28 jours de mûrissement du béton. Les résultats obtenus sont la moyenne des valeurs de trois éprouvettes. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion dont la capacité maximale est de 150 kN en cisaillement.

4.4 Conclusion

Les caractéristiques récoltées concernant les matériaux utilisés sont largement suffisantes pour réaliser notre étude expérimentale. En plus, il semble que la qualité de ces matériaux est acceptable au marché Algérien. D'autre part, les essais effectués permettent d'évaluer l'essentiel des propriétés des mélanges cimentaires confectionnés aux états frais et durci.

CHAPITRE 5 : EFFET DES SABLES SUR LES PROPRIÉTÉS DE BAPHP

5.1 Introduction

Dans la plupart des formations des BAP et BAPHP, le sable est le constituant qui doit équilibrer le volume total. Son volume est de l'ordre de 40 à 45% du volume de mortier, ce qui donne un rapport massique Sable/Graviers de l'ordre de 1 ou un rapport volumique sable/pâte entre 0.70 à 0.85. Le BAPHP est en principe confectionné par le sable de rivière qui convient à tous types de béton, avec une classe granulométrique 0/3 préférée par le formulateurs. Il est également recommandé d'utiliser un sable ayant une quantité assez forte des fines ($\leq 80 \mu\text{m}$), dans la plage de 4 à 8%, et un module de finesse de 1.8 à 2.8. Cette optimisation permet d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP et BAPHP, tout en engendrant un surcoût supplémentaire.

Actuellement, la plupart des bétons spéciaux sont exclusivement fabriqués par le sable de rivière. Cependant, l'Algérie, comme beaucoup de pays du monde, souffre d'un manque remarquable en ce type de sable approprié. En outre, les exigences d'environnement, l'impact sur les coûts, l'épuisement des gisements alluvionnaires et l'éloignement des chantiers par rapport à ces gisements sont tous des facteurs qui encouragent à chercher de valoriser d'autres types de sables disponibles et capables à fournir un béton de qualité.

Par ailleurs, le sable de carrière est considéré arbitrairement comme coproduit peu intéressant. Son utilisation est très rare dans les constructions de génie civil et se limite à quelques travaux des routes. Ce type de sable contient généralement des teneurs élevées en fines calcaires qui accélèrent les réactions d'hydratation du ciment et favorisent les propriétés du matériau durci au début de l'âge [Caré & al.] [Hawkins & al.]. L'utilisation de sable de carrière dans la formulation du BAP pourrait réduire non seulement son coût, mais pourrait également fournir une solution concernant les problèmes environnementaux [Bosiljkov].

En outre, le sable de dune est abondant dans le désert en état propre à coût d'extraction presque nul. Son utilisation est également très rare et limitée à quelques travaux de terrassement. En effet, il y a récemment une attention croissante à exploiter le sable de dune dans la formulation des BO et BAP [Al-Harthy & al.][Yusuf & Olawumi][Benabed & al.][Bouziani & al.]. L'exploitation du sable de dune dans cette formulation pourrait également apporter une solution économique et écologique intéressante.

L'incorporation des sables de carrière et de dune dans le BAPHP vise à valoriser les coproduits du concassage et les matériaux locaux et à bénéficier de leurs caractéristiques (quantité des fines, finesse, granularité, etc.) pour la formulation du BAPHP qui requiert normalement des quantités importantes des fines. Certes l'incorporation des sables de dune et de carrière dans la composition du béton avait connu auparavant des difficultés, mais l'évolution de l'industrie d'adjuvants, notamment le superplastifiant permet actuellement de trouver les solutions adéquates en ce qui concerne la demande en eau des matériaux cimentaires [Rmili]. On peut donc profiter de la nouvelle formulation de BAPHP pour incorporer les deux sables de carrière et de dunes qui peuvent être des composants intéressants.

Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer expérimentalement les effets des combinaisons binaires de différents types de sable (sable de rivière SR ; sable de carrière SC ; sable de dune SD) sur la compacité à l'état frais, les paramètres de la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité) et les propriétés mécaniques (résistances à la compression à 7 et 28 jours, et résistance à la traction à 28 jours) de BAPHP. Elle permet également de déterminer l'effet des combinaisons de différents types de sables et de différentes classes granulaires de graviers sur les compacités lâches et serrées de leur empilement granulaire à l'état sec.

5.2 Compacités des granulats

5.2.1 Compacités lâches et serrées des graviers

Pratiquement, il n'est pas facile de trouver des graviers naturels ou artificiels de granulométrie répondant directement à la formulation des bétons spéciaux comme les BAPHP par exemple. C'est pourquoi, on a souvent recouru à reconstituer l'empilement

des graviers par combinaison des plusieurs classes granulaires afin de corriger la distribution granulométrique et par conséquent trouver la compacité maximale. Pour le même type de graviers, l'augmentation de la compacité de leur empilement va normalement diminuer la demande en eau dans la formulation des bétons et par conséquent obtenir de haute maniabilité ou des hautes résistances mécaniques.

Dans cette étape, nous allons étudier les compacités lâches et serrées de graviers par combinaison massive de deux classes granulaires différentes 3/8 et 8/15. Pour cet objectif, nous avons établi 11 mélanges binaires de graviers en introduisant la classe grossière G8/15 dans la classe fine G3/8 par proportions massiques successives de 0 à 100%, par incrémentation de 10%.

Les valeurs obtenues des compacités lâches et serrées en fonction de la combinaison de deux classes granulaires de graviers sont représentées à la Fig. 5.1. On remarque d'abord que les courbes de la compacité lâche et de la compacité serrée prennent la même allure de fonctions polynomiales. En comparant le mode d'empilement des graviers, la compacité serrée augmente par rapport à la compacité lâche à un facteur de serrage presque constant de 1.09 à 1.11 environ. La combinaison de graviers contenant la moitié de chaque classe granulaire (50%G3/8+50%G8/15) est optimale pour les deux compacités dont les valeurs maximales sont 0.549 pour la compacité lâche et 0.606 pour la compacité serrée. La variation des compacités est symétrique autour de cette combinaison optimale qui sera utilisée dans la formulation des BAPHP.

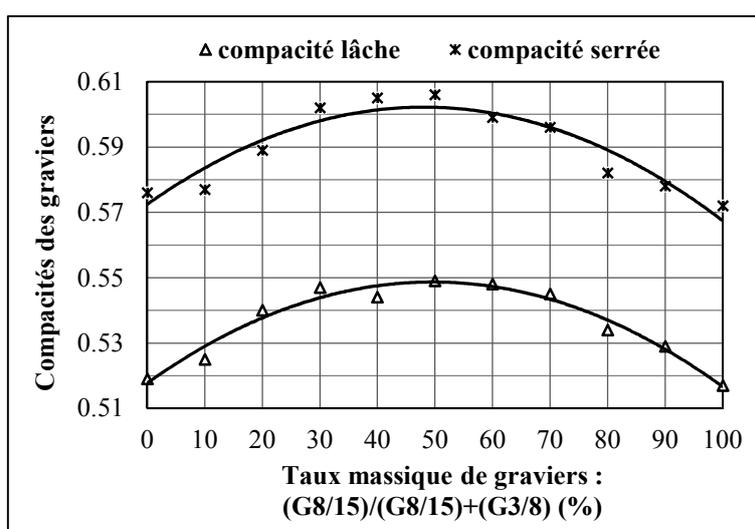


Figure 5.1 : Compacités lâches et serrées en fonction de combinaison massive de deux classes granulaires de graviers

La technique de combiner plusieurs classes granulométriques de graviers a été recommandée par plusieurs recherches afin d'augmenter la compacité. Par exemple, [Khayat & Manai] ont trouvé la compacité maximale en combinant trois classes de gravier (11%G5/10+62%G5/14+27%G5/20). Néanmoins, cette combinaison n'a pas donné les meilleures propriétés rhéologiques de BAP à cause de l'augmentation de frottement entre les graviers.

5.2.2 Compacité lâche des Sables

Durant cette étape, nous allons étudier la compacité lâche de différentes combinaisons binaires constituées par trois types de sables de référence ; sable de rivière SR, sable de carrière SC et sable de dune SD. Nous remplaçons d'abord le sable de rivière par le sable de carrière, puis le sable de rivière par le sable de dune et enfin le sable de dune par le sable de carrière. Pour cet objectif, 15 empilements des sables ont été établis par ajout progressif de 0 à 100%, avec proportion massique de 20%.

Les résultats de la compacité lâche en fonction de combinaisons granulaires de différents types de sables sont représentés sur la Fig. 5.2. Il est possible de remarquer que les courbes se figurent comme des cloches où la compacité lâche augmente par les combinaisons des sables jusqu'à des optimums, au-delà desquels, elle diminue avec ces combinaisons. Les combinaisons optimales sont, par ordre croissant, (20%SC+80%SR), (40%SD+60%SR) et (60%SC+40%SD) qui correspondent aux compactés maximales de 0,606, 0,633 et 0,637 respectivement. La comparaison de chaque sable seul montre que le sable de rivière possède une compacité de 0.567 puis le sable de dune avec 0.561 et le sable de carrière possède la compacité la plus faible de 0.543. On peut donc confirmer que la combinaison des sables permet la correction de la distribution granulométrique de leur empilement.

Par ailleurs, les combinaisons du sable de dune, extra fin, dans les sables moyens de rivière (SD/SD+SR) et de carrière (SC/SC+SD) donnent une amélioration importante de la compacité lâche. En effet, la proportion de 40%SD offre la meilleure compacité lâche. Lors de combinaison de sable de rivière ou sable de carrière avec le sable de dune, contenant la plus grande quantité des fines, les plus fins grains peuvent se placer entre les plus gros, ce qui diminue par conséquent le volume des vides et augmente la compacité. Néanmoins, l'excès de ces grains de petites dimensions est expulsé hors de la

combinaison granulaire et il forme donc d'autres volumes des vides. Or, la combinaison de deux sables moyens, sable de carrière avec le sable de rivière (SC/SC+SR), n'offre pas une amélioration claire de la compacité. Avec des sables ayant des classes granulaires comparables, la compaction de l'empilement granulaire n'est assuré que pour une faible proportion de sable de carrière (20%SC) qui permet donc d'intégrer dans les vides intergranulaires.

À l'aide de logiciel René-LCPC qui se base sur le modèle d'empilement compressible, [Rmili] a trouvé des résultats similaires. Ses combinaisons binaires optimales, correspondantes aux compacités maximales, sont obtenues avec (70%SC+30%SR), (20%SD+80%SR) et (85%SC+15%SD).

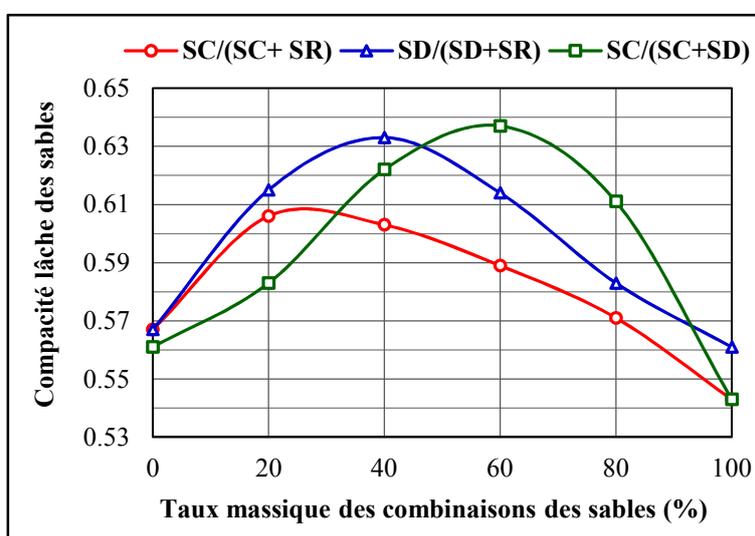


Figure 5.2 : Compacité lâche en fonction des combinaisons massiques de différents types des sables

5.2.3 Compacité serrée des Sables

Durant cette étape, nous allons étudier la compacité de mêmes mélanges précédents des sables, mais après la vibration et la compression à l'état sec. La Fig. 5.3 représente la compacité serrée en fonction de différentes combinaisons binaires de trois types de sables.

On peut remarquer que les courbes de la compacité serrée suivent presque les mêmes allures de celles de la compacité lâche. En comparant les sables lâchement empilés et les sables empilés par serrage, la compacité serrée augmente par rapport à la compacité lâche à un facteur de serrage presque constant de 1.08 à 1.16 environ. Quelle que soit la combinaison des sables, le réarrangement et l'enchevêtrement des grains se font de la

même manière sous le serrage considéré (simple versement ou vibration avec compression), indépendamment des caractéristiques des sables.

Or, la variation de la compacité serrée s'atténue de plus en plus lorsque deux sables moyens sont combinés. Plus le sable est fin, comme le sable de dune, plus l'amélioration de la compacité serrée s'est accentuée. Ceci s'explique du fait que les grains fins se réarrangent mieux que les grains grossiers dans les vides intergranulaires. Les grains fins permettent également de diminuer les effets de parois et de desserrement.

Comme la compacité lâche, les combinaisons optimales des sables (20%SC+80%SR), (40%SD+60%SR) et (60%SC+40%SD) offrent les compacités serrées maximales de 0.694, 0.710 et 0.737 respectivement.

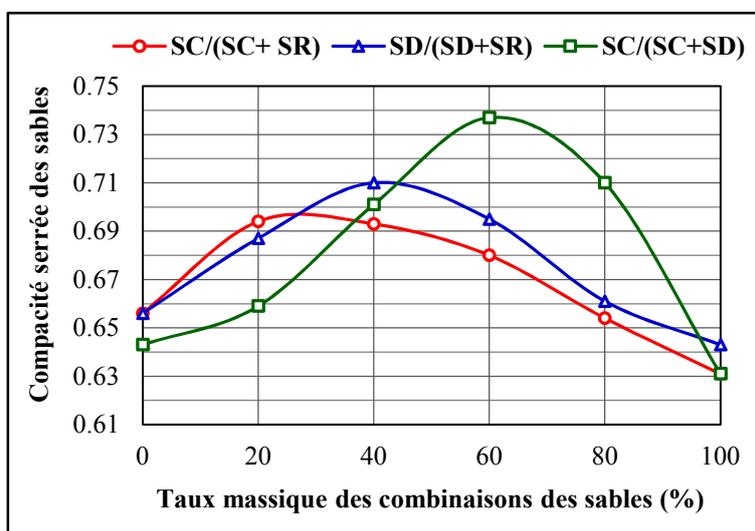


Figure 5.3 : Compacité serrée en fonction des combinaisons massiques de différents types de sables

5.3 Formulation de BAPHP

À l'heure actuelle, les BAPHP sont formulés de façon empirique car il n'existe pas de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les dosages de leurs constituants en fonction de leurs propriétés souhaitées. La majorité des méthodes de formulation des BAP-BAPHP visent une compacité maximale de l'empilement granulaire afin d'obtenir une haute maniabilité tout en préservant une haute résistance à la compression pour des quantités données d'eau et de superplastifiant.

Dans cette étude, la méthode empirique Chinoise [Su & al.] de l'optimisation de l'empilement granulaire est adoptée pour la formulation des BAPHP. Elle se base sur la détermination de volume minimum optimal de pâte liante qui peut remplir les vides intergranulaires et éliminer les frottements intergranulaires, tout en assurant les critères autoplaçants (fluidité, déformabilité et stabilité). Cette méthode a été modifiée par [Brouwers & Radix] en proposant la méthode Néerlandaise.

L'empilement de granulats sera constitué donc de deux classes de graviers (50% G3/8 + 50% G8/15) et de combinaison binaire parmi les trois sables considérés (SR ; SC ; SD). La pâte de liant sera composée de ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant. Les formulations de BAPHP ne se différencient que par les combinaisons massiques de sables à incorporer, comme celles étudiées auparavant ; SC/(SC+SR) ; SD/(SD+SR) ; SD/(SD+SC), avec incrémentation par pas de 20%.

Principe de la méthode Chinoise – Facteur d'empilement des granulats [Su & al.] :

La méthode Chinoise fait une distinction entre l'empilement granulaire lâche et celui serré. Comme le BAPHP ne se vibre pas, l'empilement le plus dense ne peut être considéré immédiatement, mais après le coulage du béton sous son poids propre. Cette compaction (réduction de volume des vides) est exprimée par la notion d'un facteur d'empilement PF qui représente la masse volumique apparente des granulats empilés par auto-serrage ρ_s dans le BAPHP par rapport à la masse volumique apparente des granulats lâchement empilés ρ_l . En d'autres termes, le PF est exprimé par le ratio de serrage entre la compacité serrée c_s et la compacité lâche c_l d'un empilement des granulats ;

$$PF = \frac{\rho_s}{\rho_l} = \frac{c_s}{c_l}$$

Les auteurs montrent que le choix de PF est primordial pour contrôler la quantité de pâte à introduire dans le béton et par conséquent à ajuster sa maniabilité. En effet, une valeur élevée de PF conduit à une quantité importante des granulats, et donc à un dosage réduit en liant, ceci affecte directement les propriétés rhéologiques et mécaniques de BAPHP. À l'inverse, une faible valeur de PF augmente le dosage en liant nécessaire pour assurer la maniabilité, mais toute quantité excédentaire du liant affecterait la durabilité et engendrait un surcoût du BAPHP. Le PF est compris généralement entre les valeurs de 1.12 et 1.18 [Rmili].

Dans notre formulation, le PF ayant des valeurs pour les graviers et les sables de : $PF_G = 1.10$ et $PF_S \cong 1.14$.

Dosages en granulats : Dans 1 m^3 , les masses des graviers G et des sables S en (kg) sont données respectivement par les formules suivantes ;

$$G = PF_G \rho_{l(G)} \left(1 - \frac{S}{g + s}\right) \quad ; \quad S = PF_S \rho_{l(S)} \left(\frac{S}{g + s}\right)$$

où ; $\rho_{l(G)}$ et $\rho_{l(S)}$ sont les masses volumiques apparentes lâches respectives des graviers et des sables en (kg/m^3) ; g et s sont les volumes respectifs des graviers et des sable en (m^3). Les auteurs ne précisent pas comment calculer exactement le rapport volumique sable/granulats ($s/g + s$) qui est pris forfaitairement de 0.50 à 0.57.

Dans notre formulation le rapport : $(s/g + s) \cong 0.5$ à 0.506, ce qui donne un rapport massique de $S/G = 1$.

Chaque dosage en graviers et en sables varie de 770.9 à 780 kg/m^3 correspondant au volume des graviers de 296.5 à 300 litres et au volume des sables de 300 à 303.5 litres.

Dosages en ciment : La méthode Chinoise estime le dosage en ciment C selon le guide de construction appliqué à Taiwan, qui stipule que 1 kg du ciment fournit 0.14 MPa de résistance à la compression dans le BAP et le BHP. Cependant, cette formule conduit à une sous-estimation du ciment. Par ailleurs, la méthode Néerlandaise estime le dosage en ciment C selon les recommandations de la Société Japonaise de Génie Civil, qui indiquent que 1 kg du ciment fournit de 0.11 à 0.14 MPa de résistance à la compression à 28 jours $R_{c_{28}}$ dans le BAP.

Pour cela, nous proposons de déterminer le dosage en ciment dans le BAPHP par la formule empirique suivante ; $C = R_{c_{28}}/1.25$.

Afin de garantir une haute résistance à la compression de 50 MPa pour toutes les formulations de BAPHP, le dosage en ciment C est pris de 400 kg/m^3 .

Dosage en additions minérales : Le volume d'addition (ici le filler calcaire) en est déduit de 1 m^3 du béton moins les autres constituants.

Le dosage en filler calcaire FC est pris égal à 150 kg/m^3 , ce qui correspond à un liant composé de teneur massique ; $L = 0.727 C + 0.273 FC$.

Teneur en eau et dosage en superplastifiant : Les rapports massiques Eau/Liant et Eau/Ciment sont estimés selon le critère de la résistance à la compression comme le BO.

La méthode n'indique pas comment déterminer le dosage en superplastifiant. Cependant, des essais de contrôle de l'étalement aux mini-cônes de Kantro ou Haegermann peuvent être effectués sur la pâte de BAPHP afin d'ajuster le couple (eau-superplastifiant) [Brouwers & Radix].

Dans notre formulation, les rapports E/L et E/C sont pris respectivement de 0.35 et 0.475, ainsi le dosage en superplastifiant de 1.5% en liquide par rapport à la masse du liant est adopté. Le rapport volumique sable/pâte (s/p) obtenu est varié de 0.780 à 0.789.

Volume d'air : Le volume d'air est estimé forfaitairement du volume total de 1.5% dans le climat chaud et 4.5% dans le climat froid.

Dans notre formulation, l'air occlus est fixé arbitrairement de 15.57 litres afin de compléter le volume total de 1 m³ de béton.

Les Tabs. 5.1 & 5.2 & 5.3 présentent les dosages des constituants des BAPHP pour différentes combinaisons massiques des sables.

Tableau 5.1 : Formulation des BAPHP pour la combinaison SC/(SC+SR)

Combinaison des sables	SC/(SC+SR)					
	0	20	40	60	80	100
Gravier 8/15 (kg/m ³)	385.45	386.36	387.27	388.18	389.09	390.00
Gravier 3/8 (kg/m ³)	385.45	386.36	387.27	388.18	389.09	390.00
Sable de rivière (kg/m ³)	770.89	618.2	464.75	310.56	155.64	0
Sable de carrière (kg/m ³)	0	154.55	309.83	465.85	622.57	780.00
Sable de dune (kg/m ³)				0		
Ciment (kg/m ³)				400		
Filler calcaire (kg/m ³)				150		
Eau efficace (kg/m ³)				190		
Superplastifiant (kg/m ³)				8.25		
Air (l/m ³)				15.57		
Granulats (kg/m ³)	1541.79	1545.47	1549.12	1552.77	1556.39	1560.00
Liant (kg/m ³)				550		
Pâte (kg/m ³)				748.25		
Béton (kg/m ³)	2290.04	2293.72	2297.37	2301.02	2304.64	2308.25
Dosage en superplastifiant (%)				1.50		
Ratio air (%)				1.56		
Rapport massique E/L				0.345		
Rapport massique E/C				0.475		
Rapport massique FC/L				0.273		
Rapport massique S/G				1		
Rapport volumique s/p	0.789	0.788	0.786	0.784	0.782	0.780

Tableau 5.2 : Formulation des BAPHP pour la combinaison SD/(SD+SR)

Combinaison des sables	SD/(SD+SR)					
	0	20	40	60	80	100
Gravier 8/15 (kg/m ³)	385.45	386.1	386.75	387.27	387.92	388.57
Gravier 3/8 (kg/m ³)	385.45	386.1	386.75	387.27	387.92	388.57
Sable de rivière (kg/m ³)	770.89	617.63	463.91	309.83	155.14	0
Sable de carrière (kg/m ³)				0		
Sable de dune (kg/m ³)	0	154.41	309.276	464.748	620.576	776.84
Ciment (kg/m ³)				400		
Filler calcaire (kg/m ³)				150		
Eau efficace (kg/m ³)				190		
Superplastifiant (kg/m ³)				8.25		
Air (l/m ³)				15.57		
Granulats (kg/m ³)	1541.79	1544.24	1546.69	1549.12	1551.56	1553.98
Liant (kg/m ³)				550		
Pâte (kg/m ³)				748.25		
Béton (kg/m ³)	2290.04	2292.49	2294.94	2297.37	2299.81	2302.23
Dosage en superplastifiant (%)				1.50		
Ratio air (%)				1.56		
Rapport massique E/L				0.345		
Rapport massique E/C				0.475		
Rapport massique FC/L				0.273		
Rapport massique S/G				1		
Rapport volumique s/p	0.789	0.788	0.787	0.786	0.785	0.783

5.4 Effet des sables sur la compacité de BAPHP frais

Dans cette étape, nous visons à étudier la compacité des BAPHP à l'état frais, formulés à la base de différentes combinaisons massiques de sables. La seule variable dans ces formulations est bien sûr le type de sable à incorporer par combinaisons binaires de trois sables de références (SR ; SC ; SD).

Les résultats de la compacité de BAPHP en fonctions des combinaisons de sables sont représentés à la Fig. 5.4. Il est possible de remarquer que la compacité des BAPHP frais suit les mêmes allures de celles des compacités lâches et serrées de l'empilement granulaire des combinaisons des sables à l'état sec. La combinaison des sables engendre donc un effet granulaire similaire sur les compacités lâches et serrées de sables à l'état sec d'une part, et la compacité des BAPHP frais d'autre part. Cette meilleure relation

entre les compacités est due au mode de serrage des BAPHP qui se fait par leur poids propre et reste donc indépendamment des caractéristiques des sables.

Tableau 5.3 : Formulation des BAPHP pour la combinaison SC/(SC+SD)

Combinaison des sables	SC/(SC+SD)					
	0	20	40	60	80	100
Gravier 8/15 (kg/m ³)	388.57	388.83	389.09	389.48	389.74	390.00
Gravier 3/8 (kg/m ³)	388.57	388.83	389.09	389.48	389.74	390.00
Sable de rivière (kg/m ³)			0			
Sable de carrière (kg/m ³)	0	155.51	311.28	467.18	623.46	780.00
Sable de dune (kg/m ³)	776.84	622.024	466.926	311.456	155.864	0
Ciment (kg/m ³)			400			
Filler calcaire (kg/m ³)			150			
Eau efficace (kg/m ³)			190			
Superplastifiant (kg/m ³)			8.25			
Air (l/m ³)			15.75			
Granulats (kg/m ³)	1553.98	1555.19	1556.39	1557.60	1558.80	1560.00
Liant (kg/m ³)			550			
Pâte (kg/m ³)			748.25			
Béton (kg/m ³)	2302.23	2303.44	2304.64	2305.85	2307.05	2308.25
Dosage en superplastifiant (%)			1.50			
Ratio air (%)			1.56			
Rapport massique E/L			0.345			
Rapport massique E/C			0.475			
Rapport massique FC/L			0.273			
Rapport massique S/G			1			
Rapport volumique s/p	0.783	0.783	0.782	0.781	0.781	0.78

En plus, les compacités des BAPHP contenant des sables non combinés sont les plus faibles et elles commencent à augmenter légèrement avec les combinaisons des sables jusqu'à des optimums de (20%SC+80%SR), (40%SD+60%SR) et (60%SC+40%SD) qui correspondent aux compactés maximales de 0.984, 0.992 et 0.994 respectivement. Au-delà de ces combinaisons optimales, ces compacités décroissent vers celles des BAPHP de sables non combinés.

Les combinaisons binaires de différents sables ont donc un effet peu favorable sur la compacité de BAPHP frais, en remplissant les vides intergranulaires et inhibant l'air occlus. Elles augmentent également la masse volumique apparente de BAPHP qui est liée directement aux teneurs et densités apparentes des sables incorporés. Ce résultat est

en accord avec l'étude de [Rmili] qui a affirmé que l'optimisation de la compacité de BAP, par combinaisons de différents types de sables, permet d'améliorer sa formulation, en réduisant la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides intergranulaires. Par conséquent, la quantité d'eau adsorbée est également réduite et la part de cette eau va contribuer à la maniabilité de BAP.

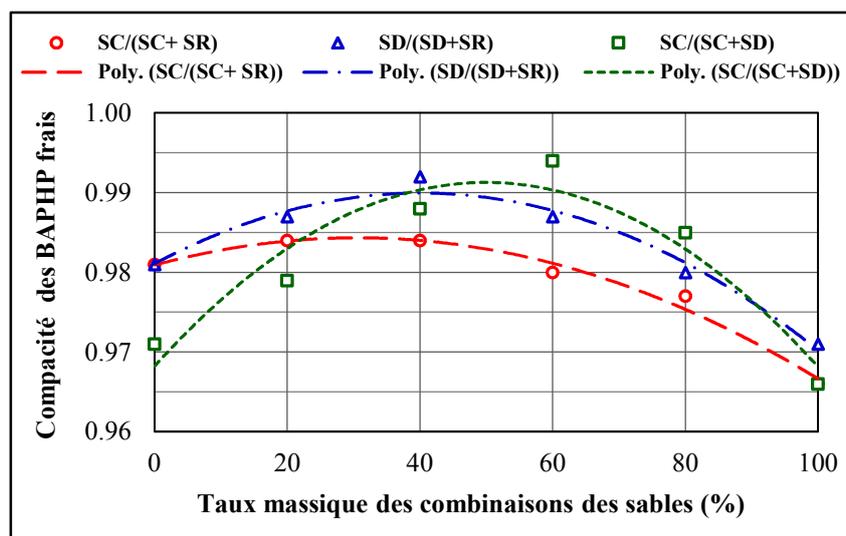


Figure 5.4 : Compacité du BAPHP frais en fonction des combinaisons massiques des sables

5.5 Effet des sables sur la maniabilité de BAPHP

5.5.1 Effet des sables sur la fluidité

L'influence des combinaisons de sables sur la fluidité des BAPHP est présentée à la Fig. 5.5. On constate que le BAPHP contenant 100%SR offre le meilleur étalement ($SF = 825$ mm), par contre celui de 100%SC possède l'étalement le plus faible ($SF = 575$ mm), et le BAPHP contenant 100%SD étale de ($SF = 705$ mm). Ceci est dû principalement à la forme et la texture des grains et la finesse des sables. En effet, le sable de carrière ayant une forme concassée angulaire tandis que le sable de rivière ayant une forme sphérique ainsi qu'une surface lisse, qui facilitent le mouvement des grains lors de l'écoulement. À cause de sa haute finesse, le sable de dune engendre une perte conséquente de la fluidité, ce qui nécessite un besoin supplémentaire, soit en eau, soit en superplastifiant. De plus, toutes les combinaisons des sables gardent le critère d'autoplaçant ($SF \geq 550$ mm).

Cet avantage est grâce au dosage très élevé de superplastifiant qui offre la possibilité d'utiliser les sables de carrière et de dune dans les BAPHP pour des raisons économiques.

En outre, la substitution de sable de rivière par le sable de carrière ou de dune et la substitution de sable de dune par le sable de carrière affectent grandement la fluidité. En effet, les étalements de ces combinaisons (SC/SC+SR, SD/SD+SR et SC/SC+SD) sont des fonctions décroissantes à l'ajout des sables de carrière et de dune. La diminution de la fluidité dans la combinaison (SC/SC+SR) est plus importante que les autres. Ces résultats ne sont pas en accord avec la recherche de [Rmili], qui a montré que l'incorporation de sable de carrière au sable de rivière provoque une légère baisse de la fluidité sauf pour une teneur modérée en sable de carrière (30%SC) donnant un étalement optimum. En plus, [Rmili] a affirmé que l'ajout du sable de dune au sable de rivière n'augmente pas l'étalement. Or, l'ajout du sable de dune au sable de carrière jusqu'à une teneur de 15% améliore cet étalement.

Par ailleurs, on peut remarquer que les combinaisons de différents sables, qui possèdent les compacités maximales, ne présentent pas les étalements optimums. Ces résultats s'expliquent par le fait que la quantité d'eau, libérée par la réduction du volume des vides, n'est pas suffisante pour fluidifier ni la surface rugueuse de grains de sable de carrière ni la surface supplémentaire des grains fins de sable de dune. Les effets des grains des sables sur la fluidité des BAPHP sont donc prépondérants par rapport à ceux de la compacité.

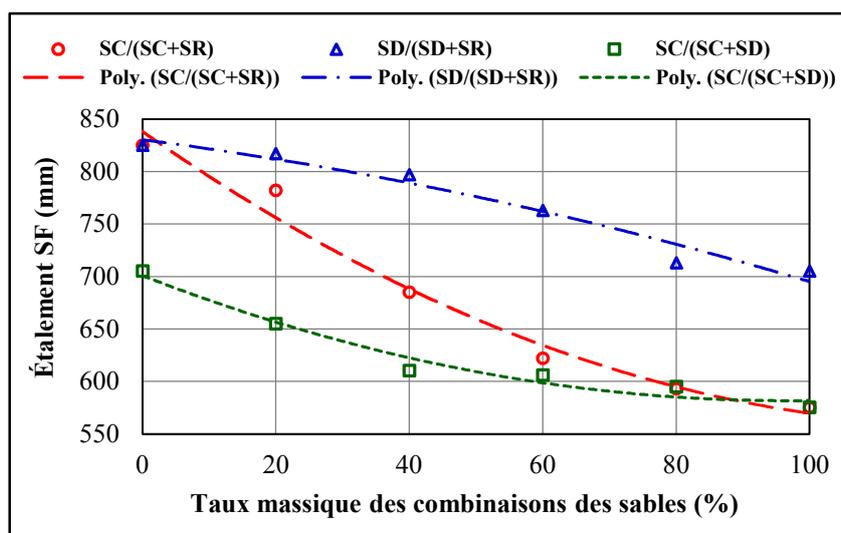


Figure 5.5 : Fluidité du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables

5.5.2 Effet des sables sur la déformabilité

L'effet des combinaisons de sables sur la déformabilité des BAPHP est représenté à la Fig. 5.6. On peut voir que les courbes de taux de remplissage à la boîte en L, en fonction de combinaisons de sables, prennent presque les mêmes allures de l'étalement au cône d'Abrams (Fig. 5.5). La meilleure relation entre la fluidité et la déformabilité s'avère logique pour les formulations des BAPHP ayant des dosages constants. L'incorporation de sable de carrière ou de dune dans le sable de rivière et l'incorporation de sable de carrière dans le sable de dune réduisent directement la déformabilité. En plus, on constate que le meilleur taux de remplissage ($PL = 0.96$) est donné par le BAPHP de 100%SR par contre le plus faible ($PL = 0.61$) est celui de 100%SC. Le BAPHP de 100%SD ayant un taux de remplissage ($PL = 0.84$). Comme la fluidité de BAPHP, les combinaisons des sables ayant les compacités maximales n'offrent pas les déformabilité optimales.

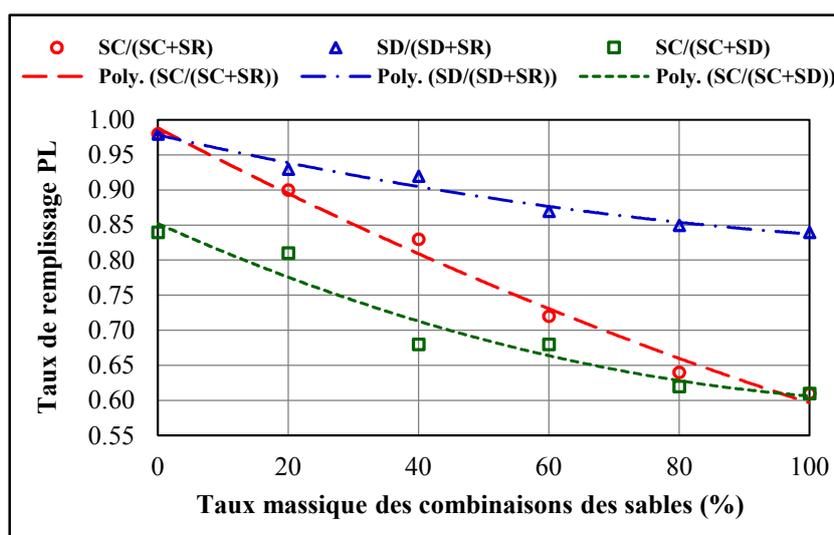


Figure 5.6 : Déformabilité du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables

Bien que le dosage en superplastifiant soit très élevé, cette diminution est très importante pour les combinaisons (SC/SC+SR) et (SC/SC+SD) où les bétons perdent leur critère autoplaçant ($PL \geq 0.80$) lorsque la teneur en sable de carrière dépasse respectivement 40% et 20%. Ce résultat s'explique par l'augmentation du frottement entre les grains anguleux de sable de carrière, ce qui provoque un certain blocage aux espacements entre les armatures de la boîte en L. Cependant, la diminution de la déformabilité est faible pour la combinaison (SD/SD+SR) où le taux de remplissage reste convenable au critère

autoplaçant. Ceci est dû à la quantité importante des fines (12%) dans le sable de dune, qui pourrait augmenter la viscosité des BAPHP.

5.5.3 Effet des sables sur la stabilité

La stabilité des BAPHP en fonction des combinaisons de sables sont donnée à la Fig. 5.7. On remarque d'abord que toutes les combinaisons des sables donnent des bétons ayant des indices de ségrégation convenables au critère autoplaçant ($SR \leq 20\%$). Cet indice de ségrégation est très faible dans le BAPHP contenant des dosages élevés en sable de carrière, ce qui montre son effet bénéfique sur la stabilité des BAPHP. En effet, l'incorporation de sable de carrière dans le sable de rivière ou de dune diminue systématiquement l'indice de ségrégation. À titre d'exemple, cette amélioration de stabilité pour 100%SC, est de l'ordre de 72% et 73% par rapport aux 100%SR et 100%SD respectivement. Ce résultat s'explique du fait que les grains anguleux, ayant également de texture rugueuse, de sable de carrière peuvent augmenter la cohésion et la viscosité des BAPHP, ce qui rend très difficile de dissocier les constituants les uns des autres.

Par ailleurs, on remarque que l'indice de ségrégation en fonction de l'ajout du sable de dune au sable de rivière prend presque les mêmes valeurs de 10 à 12%. On peut dire donc que l'introduction de sable de dune dans le sable de rivière n'a pas d'effet remarquable sur la stabilité. Ces résultats s'expliquent par le fait que l'ajout de sable de dune ne peut pas modifier la tendance des grains à se déplacer ou se compacter dans les BAPHP.

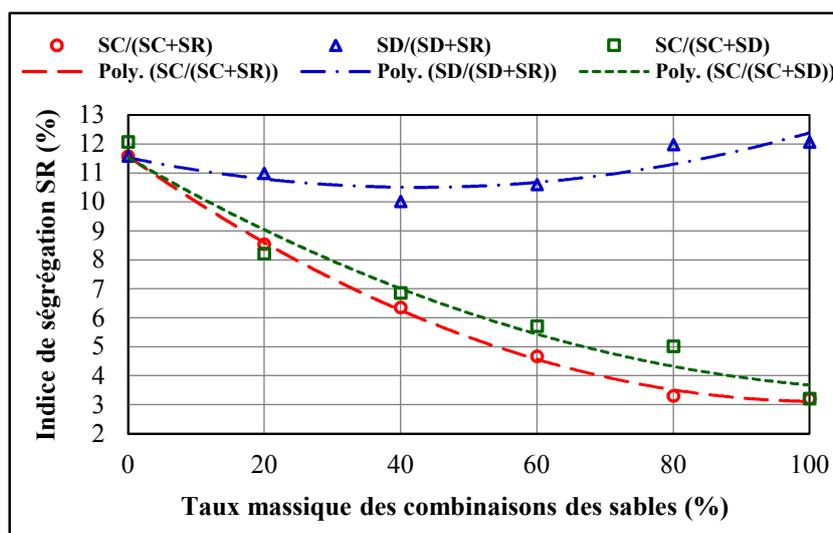


Figure 5.7 : Stabilité du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables

5.6 Effets des sables sur les résistances mécaniques

5.6.1 Effets des sables sur les résistances à la compression

Les Figs. 5.8 & 5.9 montrent l'effet des combinaisons massiques de différents types de sables sur les résistances à la compression à 7 et 28 jours respectivement. On constate que l'ajout proportionnel de sable de carrière aux sables de rivière et de dune augmente systématiquement les résistances à la compression. Par contre, l'ajout de sable de dune au sable de rivière diminue de façon remarquable les résistances à la compression, malgré que les deux sables aient la même nature minéralogique (silice) et la même forme roulée des grains.

À 7 et 28 jours, les résistances à la compression les plus élevées sont obtenues pour toutes les combinaisons (SC/SC+SR) qui offrent des hautes résistances aux bétons ; et en particulier lorsque le teneur en sable de carrière est très élevée ($SC \geq 80\%$). Ces améliorations des résistances résultent essentiellement de la morphologie et la nature calcaire des grains de sable de carrière. En effet, la grande taille, la granulométrie étalée, la forme angulaire et la texture rugueuse assurent une meilleure adhérence entre la pâte de liant et ces grains [*de Larrard*] [*Lecomte & al.*]. De même, [*Farran & al.*] ont confirmé la formation d'un lien intime entre les grains de calcaire et la pâte de ciment qui résulte de plusieurs mécanismes, y compris un verrouillage mécanique important en raison d'une surface de contact rugueuse. Ici, le sable de carrière améliore les résistances à la compression par sa texture rugueuse qui peut solidifier l'adhérence entre la pâte de liant [*Achour*] et non pas par l'augmentation de la compacité. En effet, [*de Larrard*] a montré que l'enchevêtrement des gains anguleux du sable de carrière dans le BO amène plus de résistances mécaniques par rapport aux grains arrondis du sable de rivière.

Par ailleurs, les bétons contenant des teneurs faibles en sable de dune ($SD \leq 20\%$) possèdent également ces hautes résistances à la compression, mais pour des teneurs modérées ou élevées ($SD > 20\%$), les résistances à la compression ne répondent pas au critère de hautes performances. En effet, le sable de dune affecte ces résistances mécaniques par sa finesse très élevée et par ses grains de forme arrondie et de diamètre maximal très fin.

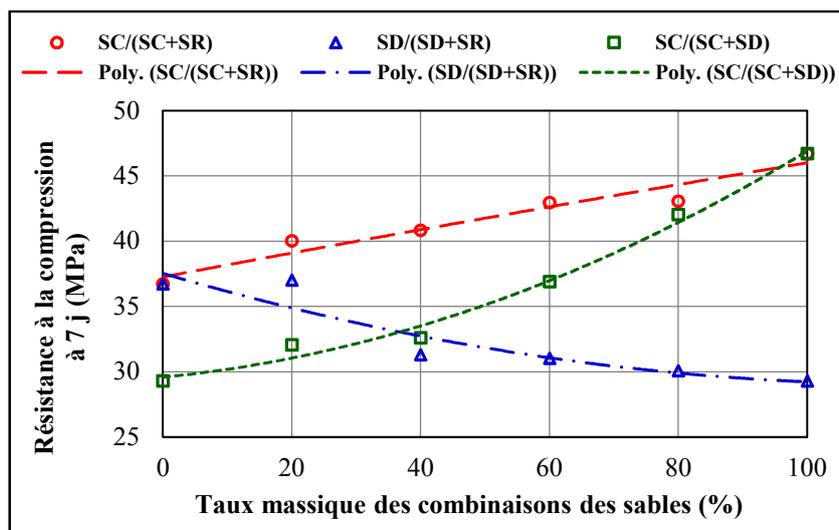


Figure 5.8 : Résistance à la compression à 7 j du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables

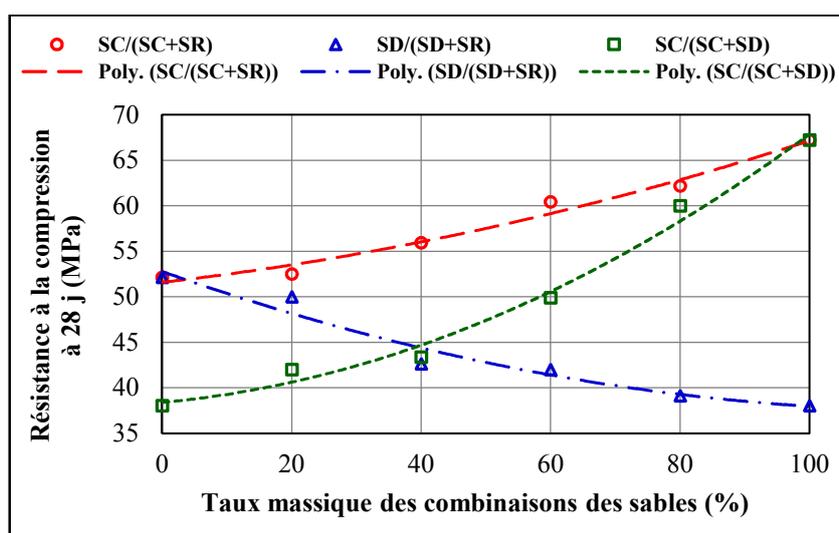


Figure 5.9 : Résistance à la compression à 28 j du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables

5.6.2 Effets des sables sur la résistance à la traction

La Fig. 5.10 représente l'effet des combinaisons massiques de différents types de sables sur les résistances à la traction à 28 jours des BAPHP. Les résultats obtenus montrent que ces résistances à la traction des BAPHP sont en excellent accord avec leurs résistances à la compression. En effet, la résistance à la traction à 28 jours est évoluée similairement aux résistances à la compression à 7 et 28 jours et indépendamment donc des combinaisons de sables. L'augmentation des résistances à la compression du béton

s'accompagne fréquemment d'une amélioration d'autres propriétés telles que la résistance à la traction.

L'ajout de sable de carrière, quelle que soit sa teneur, aux sables de rivière et de dune augmente systématiquement la résistance à la traction à 28 jours. Le gain de cette résistance est très important dans les combinaisons de (SC/SC+SD) et aussi important dans celles de (SC/SC+SR). Par exemple, la plus grande résistance à la traction est obtenue pour toutes les combinaisons (SC/SC+SR) ; en particulier pour les combinaisons optimales (20%SR+80%SC et 100%SC) 7,96 et 9,68 MPa respectivement. Ce résultat bénéfique de sable de carrière s'explique par sa nature calcaire identique aux graviers et par sa morphologie rugueuse, ce qui favorise une adhérence de pâte-granulats homogène et accrue, et par conséquent augmente la ductilité et la résistance à la traction du béton [Ahour].

Cependant, la substitution du sable de rivière par le sable de dune diminue la résistance à la traction, et notamment pour des fortes teneurs en sable de dune. Ceci est dû également au faible diamètre maximal des grains de sable de dune, malgré que les deux sables de rivière et de dune aient la même nature minéralogique (silice) et la même forme arrondie des grains. Les bétons contenant de faibles teneurs en sable de dune ($SD \leq 20\%$) possèdent également une haute résistance à la traction.

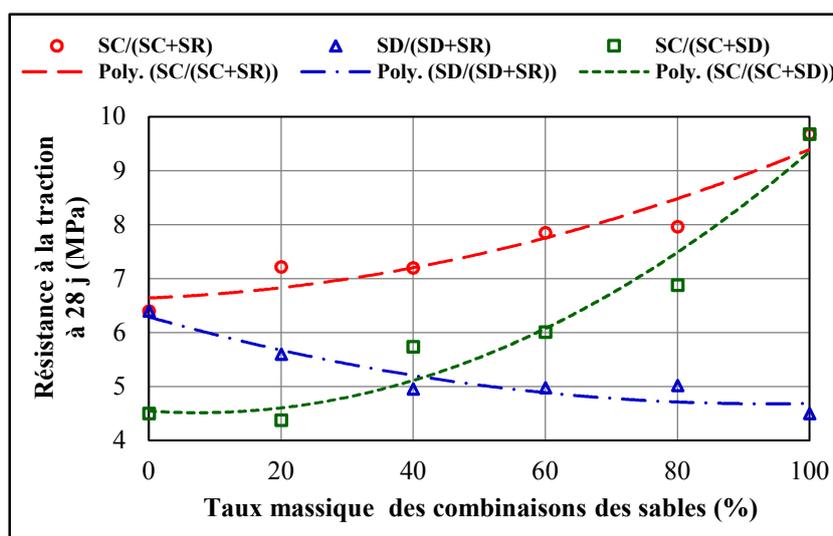


Figure 5.10 : Résistance à la traction à 28 j du BAPHP en fonction des combinaisons massiques des sables

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les propriétés de la maniabilité et les résistances mécaniques de BAPHP sont caractérisées pour différentes combinaisons massiques binaires de trois types de sables ; de rivière, de carrière et de dune. Cette étude expérimentale nous a permis de développer certaines formulations des BAPHP à base des sables de carrière et de dune.

Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les combinaisons binaires de différents types de sables ont un effet positif sur les compacités lâches et serrées de l’empilement des sables à l’état sec. De même, la combinaison de deux classes granulométrique différentes de graviers peut améliorer ces compacités.
- la compacité des BAPHP frais est légèrement influencée par les combinaisons des sables. Les combinaisons binaires optimales de (20%SC+80%SR), (40%SD+60%SR) et (60%SC+40%SD) augmentent la compacité des BAPHP aux valeurs maximales respectivement de 0.984, 0.992 et 0.994. Néanmoins, ces compacités maximales ne donnent ni les meilleures propriétés rhéologiques ni les meilleures résistances mécaniques des BAPHP. En effet, il n’existe pas de relation cohérente entre la compacité du BAPHP frais après sa mise en place, d’une part, et ses paramètres de la maniabilité et ses résistances mécaniques d’autre part.
- L’ajout de sable de carrière ou sable de dune dans les BAPHP diminue considérablement leur fluidité. Cependant, toutes les combinaisons des sables de carrière et de dune répondent au critère de la fluidité d’autoplaçant.
- L’ajout des sables de carrière et de dune dans les BAPHP diminue également leur déformabilité. Cette diminution est très importante à l’ajout de sable de carrière dans le sable de rivière ou de dune, où les bétons perdent le critère autoplaçant de la déformabilité lorsque la teneur en sable de carrière dépasse 40% et 20% dans les combinaisons (SC/SC+SR) et (SC/SC+SD) respectivement. Cependant, la diminution de la déformabilité est faible à l’ajout de sable de dune au sable de rivière, où la déformabilité reste adaptée au critère autoplaçant.

- Toutes les combinaisons des sables donnent aux bétons une stabilité appropriée au critère autoplaçant. Le sable de carrière améliore grandement la stabilité des BAPHP. En effet, cette amélioration est une fonction croissante à l'incorporation du sable de carrière au sable de rivière ou de dune. Par contre, le sable de dune a un effet négligeable sur la stabilité des BAPHP.
- L'ajout proportionnel de sable de carrière aux sables de rivière et de dune augmente considérablement les résistances à la compression à 7 et 28 j des BAPHP. Toutes les combinaisons de (SC/SC+SR) offrent aux bétons des résistances à hautes performances. Par contre, l'ajout de sable de dune aux sables de rivière et de carrière affecte ces résistances à la compression. Les bétons contenant des faibles teneurs en sable de dune ($SD \leq 20\%$) possèdent également des résistances à hautes performances.
- Les résistances à la traction à 28 jours sont en excellent accord avec celles à la compression de BAPHP indépendamment des différentes combinaisons de sables.
- Cette attribution est très intéressante du point de vue économique et environnemental car la possibilité d'utiliser le sable de carrière ou de dune dans la formulation de BAPHP peut soulager davantage le domaine de constructions.

CHAPITRE 6 : EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES PROPRIÉTÉS DE BAPHP

6.1 Introduction

Le BAPHP est un mélange de granulats, ciment, addition minérale, eau, superplastifiant et éventuellement une fumée de silice ou un agent de viscosité. On peut obtenir une infinité de sa qualité en faisant varier les proportions de ses constituants. C'est certes que, parmi ces bétons, tant par leur nature propre qu'en raison du travail à exécuter, certains seront mauvais, d'autres seront acceptables, d'autres enfin, les moins nombreux, seront bons. L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction.

Le développement des bétons spéciaux, tels que le BHP, le BAP et le BAPHP, montre que l'incorporation combinée d'additions minérales et de superplastifiant conduit généralement à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour assurer la maniabilité souhaitée, tout en apportant des améliorations aux performances mécaniques. Dans le BAPHP, l'utilisation d'au moins d'une addition minérale en substitution le ciment dans sa formulation est indispensable pour régler le dosage important en ciment, qui peut provoquer l'augmentation de la chaleur d'hydratation et produire des fissurations thermiques, ainsi pour maintenir certaines propriétés de la maniabilité, des propriétés mécaniques et de la durabilité, tout en réduisant son coût.

D'autre part, les travaux de recherches publiés ne permettent pas encore de disposer une approche suffisamment rationnelle permettant de prévoir l'effet que peut produire une addition donnée dans une formulation de BAPHP. En effet, nous ne maîtrisons pas encore ni le type adéquat ni le dosage optimal des additions capables de donner ses propriétés rhéologiques et mécaniques ciblées.

La valorisation des additions minérales, en tant que matériaux naturels ou coproduits industriels, dans un béton de hautes qualités comme le BAPHP, ayant également un aspect technique, économique et écologique très important. C'est pourquoi, les additions

minérales sélectionnées dans cette étude sont différentes, localement disponibles et moins coûteuses. Ce sont ; le filler calcaire, la pouzzolane naturelle et le laitier granulé.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effet de l'incorporation des additions minérales telles que, le filler, la pouzzolane et le laitier, sur les propriétés rhéologiques et les résistances mécaniques de BAPHP et son mortier afin de maîtriser leur utilisation. En outre, l'étude contribue à fournir des règles rationnelles à la formulation de BAPHP et des modèles pouvant prévoir la maniabilité et la résistance mécanique de son mortier. L'étude se fait par une optimisation poussée sur trois échelles, la pâte, le mortier et le béton, afin de développer une série de BAPHP à base de ces additions sans recours à la fumée de silice ou l'agent de viscosité.

6.2 Étapes et paramètres de l'étude

Les propriétés rhéologiques et mécaniques de BAPHP sont généralement contrôlées par un ajustement approprié à l'échelle de mortier et une sélection adéquate de la teneur et classe granulaire des graviers. À son tour, le mortier est souvent contrôlé à l'état frais par les propriétés rhéologiques de la pâte avec adaptation appropriée du sable.

Pour atteindre donc les objectifs de cette étude, le programme expérimental est divisé en sept étapes par succession des échelles de pâte, mortier et béton, comme suit :

- Étape 1 : Optimisation rhéologique à l'échelle de la pâte.
- Étape 2 : Développement du mortier autoplaçant à hautes performances MAPHP.
- Étape 3 : Optimisation rhéologique à l'échelle du mortier.
- Étape 4 : Optimisation de la résistance à la compression à l'échelle du mortier.
- Étape 5 : Développement du béton autoplaçant à hautes performances BAPHP.
- Étape 6 : Optimisation des propriétés de la maniabilité à l'échelle du béton.
- Étape 7 : Optimisation des résistances mécaniques à l'échelle du béton.

Les optimisations de la composition des matériaux cimentaires nécessitent un réglage minutieux de plusieurs paramètres rhéologiques et mécaniques. Pour atteindre ces optimisations, le programme expérimental est basé sur l'évaluation des paramètres suivants ;

- L'étalement au mini-cône de Kantro de la pâte.
- L'étalement au mini-cône de Haegermann et le temps de l'écoulement au mini-entonnoir du mortier.
- La résistance à la compression à 28 jours du mortier.
- L'étalement et le temps de l'étalement au cône d'Abrams, la longueur de l'écoulement à la boîte LCPC, le taux de remplissage à la boîte en L et l'indice de ségrégation au tamis du béton.
- Les résistances à la compression à court, moyen et long terme (7, 28 et 90 jours), ainsi la résistance à la traction par flexion à 28 jours du béton.

6.3 Optimisation rhéologique à l'échelle de la pâte

Le BAPHP peut être simplifié d'un mélange polyphasique à un matériau biphasique composé des granulats dans la pâte liante. Sa rhéologie est gouvernée essentiellement par l'écoulement de sa matrice de pâte qui est considérée comme une suspension concentrée des fines cimentaires (ciment et additions) dans l'eau adjuvantée. Chaque constituant de la pâte joue un rôle important aussi bien sur le comportement rhéologique que sur les propriétés mécaniques.

Cette séquence consiste à étudier l'effet de l'incorporation de différentes additions minérales sur la fluidité à l'échelle de la pâte. La rhéologie de la pâte a été donc isolée afin de mieux comprendre les interactions qui existent entre les fines (ciment et additions), l'eau et le superplastifiant. Cela permet de prédire le comportement rhéologique du BAPHP en fonction des dosages en additions minérales. À cet effet, nous avons procédé à une campagne d'essais sur la pâte au mini-cône de Kantro afin d'évaluer son étalement relatif qui permet, par la suite, de déterminer les quantités nécessaires en eau et en superplastifiant pour fluidifier la pâte. Il convient de rappeler que l'étalement relatif de la pâte est donné par : $\Gamma_p = (SF_p/38)^2 - 1$, où SF_p est l'étalement en (mm).

6.3.1 Demande en eau pour les fines simples

Dans un premier temps, nous allons déterminer la quantité d'eau nécessaire pour fluidifier le liant composé des fines simples sans aucune combinaison (ciment Portland C, fillers calcaire FC, pouzzolane naturelle PN, laitier granulé LG).

L'introduction de l'eau dans les fines se fait par le rapport volumique eau/liant (e/l) au lieu de rapport massique Eau/Liant (E/L). Le rapport e/l est choisi, pour chaque type de liant, dans la plage de 0.6 à 1.6, par pas de variation de 0.1 afin de couvrir la gamme de hautes résistances. Le volume des fines est maintenu constant à 100 cm³ pour toutes les éprouvettes confectionnées.

Comme le montre la Fig. 6.1, toutes les pâtes, quel que soit le type des fines, présentent un comportement linéaire entre l'étalement relatif Γ_p et le rapport e/l . Comme c'était prévu, la fluidité des fines a donc obéi à la linéarisation de [Okamura & Ozawa], qui est donnée par l'équation d'une droite suivante ;

$$\frac{e}{l} = \alpha_p \Gamma_p + \beta_p$$

où :

α_p : La pente de la droite, notée par le coefficient de déformation, qui permet de déterminer la sensibilité de la fluidité de pâte à la variation de la teneur en eau [Okamura & al.] [Domone & Hsi-Wen].

β_p : L'ordonnée à l'origine de l'axe e/l , notée par le ratio d'eau retenu, en dessous de laquelle aucun étalement n'a eu lieu. Ce ratio permet donc de déterminer la teneur en eau minimale qui fluidifie le liant et déclenche l'étalement de la pâte. Il correspond à la somme des quantités d'eau adsorbée sur la surface des grains des fines et d'eau requise à remplir les vides intergranulaires et à disperser suffisamment les grains afin que l'étalement commence [Okamura & al.] [Domone & Hsi-Wen].

Les valeurs de α_p et β_p , obtenues par analyse de régression pour chaque type des fines, sont également montrées à la Fig. 6.1. D'après cette figure, le besoin en eau des pâtes varie sensiblement à la nature et la forme des grains des fines. En effet, le ciment, considéré comme fines de référence, possède les valeurs de coefficient de déformation α_p et du ratio d'eau retenu β_p les plus grandes par rapport aux autres additions, ce qui

indique une faible sensibilité de fluidité à la teneur en eau et une grande demande en eau. Concernant les fines additions, le laitier ayant les valeurs de α_p et β_p les plus élevées qui sont proches de celles de ciment, tandis que le filler possède les valeurs les plus faibles, et la pouzzolane présente un comportement médian vis-à-vis au besoin en eau.

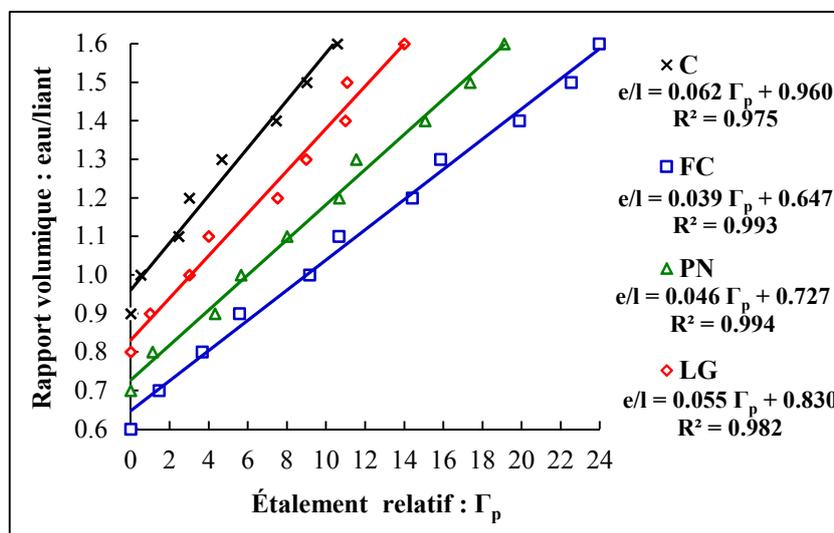


Figure 6.1 : Modèles linéaires d'étalement relatif Γ_p de la pâte en fonction de rapport volumique e/l pour différents types des fines (C ; FC ; PN ; LG)

Dans la pratique, plusieurs chercheurs préfèrent présenter l'étalement relatif Γ_p en fonction du rapport massique E/L qui donne directement les dosages (masses) des fines. En utilisant la relation simple entre les masses et les volumes, on obtient ;

$$\frac{E}{L} = \frac{\rho_E e}{\rho_L l} = \frac{\rho_E}{\rho_L} (\alpha_p \Gamma_p + \beta_p) = a_p \Gamma_p + b_p$$

où ; ρ_E et ρ_L sont respectivement la masse volumique de l'eau et la masse volumique absolue de du liant considéré.

$a_p = (\rho_E/\rho_L)\alpha_p$ et $b_p = (\rho_E/\rho_L)\beta_p$ sont respectivement le ratio massique retenu d'eau et le coefficient massique de déformation.

La Fig. 6.2 représente les modèles linéaires de régression de l'étalement relatif Γ_p de la pâte en fonction de rapport massique E/L pour chaque liant. On remarque, cette fois-ci, que les modèles massiques sont rapprochés par rapport à leurs correspondants volumiques, ceci est une conséquence logique à la liaison de l'étalement relatif aux densités absolues des fines.

La technique de travailler par volumes permet, pour chaque rapport e/l , de conserver le même volume des fines, le même volume de l'eau et, par conséquent, le volume total de la pâte demeure sans changement. Dans ce cas, la compacité de la matrice de la pâte ne se différencie que par l'effet granulaire des fines engendrant seulement la variation de la fluidité de pâte. Cette technique est bien adoptée pour incorporer les additions minérales dans le BO [Bessa-Badreddine] [Boudchicha] et pour formuler le BAP par les approches des optimisations de mortier [Okamura & al.] [Domone¹] et de pâte [Bui Van & Montgomery] [Oh & al.]. Cependant, pour le même rapport volumique e/l , la masse des fines augmente proportionnellement à leur densité absolue, et par conséquent, la masse totale de la pâte augmente également, mais par contre, le rapport massique E/L correspondant diminue. Dans notre étude, la masse volumique absolue du ciment est plus forte que celles des additions ($\rho_C < \rho_{LG} < \rho_{PN} < \rho_{FC}$), ce qui est généralement le cas, on a donc un dosage du ciment plus fort que ceux des additions ($C < LG < PN < FC$). Cette augmentation des masses dans la matrice de la pâte est plus importante lorsque la différence entre la densité du ciment et celle de l'addition est significative.

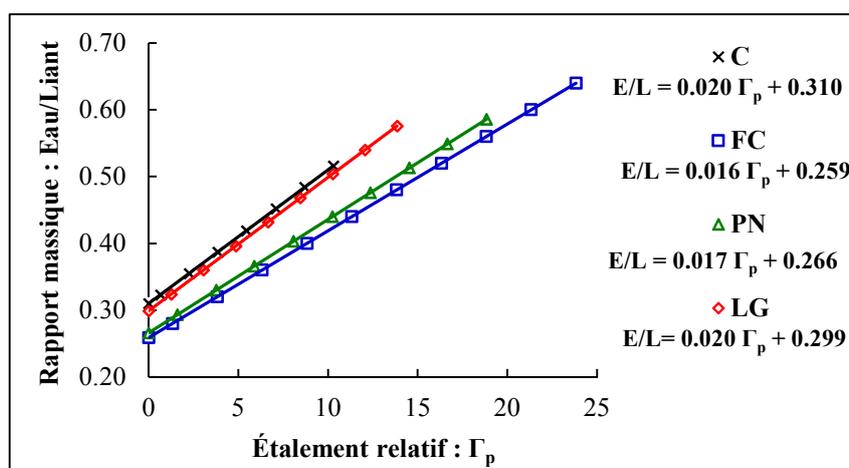


Figure 6.2 : Modèles linéaires d'étalement relatif Γ_p de la pâte en fonction de rapport massique E/L pour différents types des fines (C ; FC ; LG ; PN)

6.3.2 Demande en eau pour les liants binaires

En second lieu, nous allons déterminer le besoins en eau des liants binaires en substitution progressivement le ciment par des teneurs en additions minérales de 0 à 50%, par pas de variation de 10%. Cette substitution volumique se fait pour un volume de liant constant de 100 cm^3 .

La Fig. 6.3 illustre la variation de ratio d'eau retenu β_p en fonction de taux des additions minérales. Pour un volume du liant constant, la substitution du ciment par les additions peut conduire à une diminution ou à une augmentation de la demande en eau, selon leur type et leur teneur. Pour les additions, filler, pouzzolane et laitier, qui nécessitent seules un besoin en eau inférieur à celui du ciment, leur incorporation dans le liant entraîne encore une diminution de la demande en eau. Cette diminution est plus au moins importante selon le type de l'addition. Pour chaque addition, la teneur de 30% filler garantit la valeur la plus faible de β_p , puis 30% de pouzzolane et en dernière 40% laitier. Cependant, au-delà de ces teneurs optimums, le besoin en eau augmente légèrement vers celui des additions seules. Ces additions fines ayant donc un effet de remplissage et créent un effet fluidifiant.

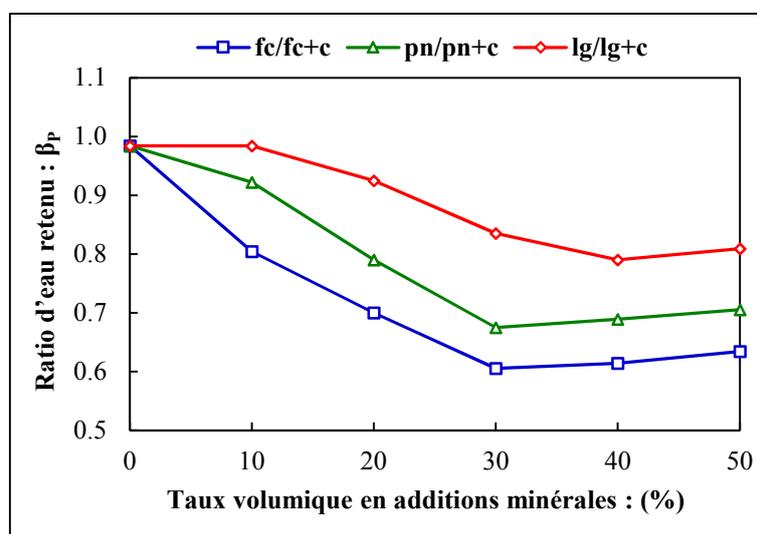


Figure 6.3 : Ratio d'eau retenu β_p de la pâte en fonction de taux volumique en additions minérales

Plusieurs chercheurs préfèrent estimer la demande en eau du liant par le concept de la compacité expérimentale C_{exp} , proposé par [Okamura & Ozawa]. Elle est donnée en fonction de ratio d'eau retenu β_p par l'équation suivante ;

$$C_{exp} = \frac{1}{1 + \beta_p}$$

La Fig. 6.4 représente la compacité expérimentale C_{exp} de la pâte en fonction de taux des additions minérales. Par analogie avec les courbes de β_p , la substitution du ciment par le filler, pouzzolane et laitier, à des proportions optimums, augmente la compacité de la pâte. L'augmentation de la compacité par les additions est due à l'amélioration de la

distribution granulaire et la limitation de frottement intergranulaire. Cependant, au-delà des teneurs optimums, la compacité la pâte diminue à cause de l'augmentation de frottement intergranulaire [Yahia & al.].

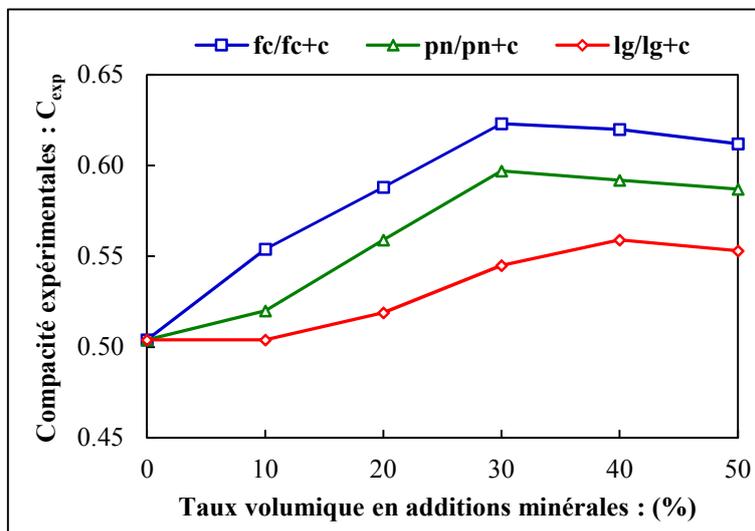


Figure 6.4 : Compacité expérimentale C_{exp} de la pâte en fonction de taux volumique en additions minérales

6.3.3 Efficacité du superplastifiant pour le ciment

Dans cette étape, nous avons déterminé l'efficacité de superplastifiant pour fluidifier complètement la pâte de ciment. Nous avons vérifié également la compatibilité de couple ciment-superplastifiant par la détection s'il y a un risque de perte rapide de fluidité. L'essai utilisé de l'étalement de la pâte au mini-cône de Kantro peut également donner une indication sur le dosage de saturation en superplastifiant SP^* , la dose au-delà de laquelle la variation de la fluidité est négligeable.

Les pâtes sont confectionnées à base du liant simple de ciment dans l'eau adjuvantée par le superplastifiant. Cette série expérimentale consiste à conserver un même volume du ciment et changer le rapport volumique e/c de 0.775 à 1.550, par pas de 0.155, correspondant au rapport massique de 0.25 à 0.50 par pas de 0.05. La pâte est dosée en superplastifiant par des dosages croissants de 0 à 0.7% par pas de 0.1%, en extrait sec par rapport à la masse du ciment. Ces dosages couvrent largement la plage recommandée par le producteur. Le Tab. 6.1 donne la composition des différentes pâtes du ciment destinées à l'optimisation de dosage en superplastifiant.

Tableau 6.1 : Composition des pâtes de ciment de l'optimisation de dosage en superplastifiant

Pâte	1	2	3	4	5	6	7		
Ciment	(cm ³)	100	100	100	100	100	100		
	(g)	310	310	310	310	310	310		
Eau efficace	(cm ³)	77.5	93.0	108.5	124.0	139.5	155.0		
Rapport e/c		0.775	0.930	1.085	1.240	1.395	1.550		
Rapport E/C		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50		
Volume total	(cm ³)	178	193	209	224	240	255		
Masse totale	(g)	388	403	419	434	450	465		
Superplastifiant (%)		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

La Fig. 6.5 représente la variation de l'étalement relatif de la pâte de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports e/c . L'augmentation de dosage en superplastifiant augmente généralement l'étalement relatif pour tous les rapports e/c . La réduction du besoin en eau est donc assurée par le superplastifiant. On peut constater également que les plus importantes augmentations de l'étalement relatif sont obtenues dans le palier de dosage en superplastifiant de 0 à 0.4% pour tous les rapports e/c . Cela correspond au plier de l'efficacité de superplastifiant.

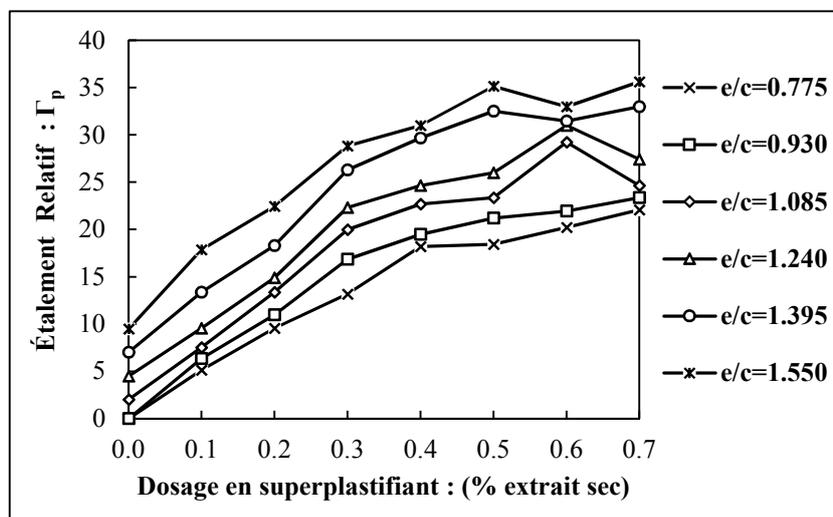


Figure 6.5 : Étalement relatif de la pâte de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports e/c .

Par ailleurs, au-delà de dosage en superplastifiant de 0.6%, les étalements deviennent instables, soit par une diminution, soit par une légère augmentation, où le superplastifiant n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire. On estime donc que 0.6% est la dose de saturation SP* pour la pâte de ciment. En plus, les paliers de saturation sont bien évidents

avec les faibles rapports e/c de 0.775 et 0.930. Au-delà ces rapports faibles et avec la dose de saturation SP^* , la galette d'étalement de la pâte ne devient pas uniforme par la présence de sédimentation des fines. Dans ces limites, la pâte est déstructurée et perd sa viscosité qui maintient les fines en suspension.

6.3.4 Demande en superplastifiant pour les liants binaires

Cette étape consiste à mesurer la demande en superplastifiant des pâtes composées des liants binaires (ciment et addition minérale). Les liants choisis contenant 30% filler, 30% pouzzolane, et 40% laitier, qui ont un besoin en eau minimal, ainsi 100% ciment comme témoin. Le rapport e/l est fixé faible de 0.775 pour mettre en évidence l'effet de superplastifiant qui est introduit avec des dosages croissants de 0 à 0.7% par dose unitaire de 0.1%, en extrait sec par rapport à la masse du liant.

Le Tab. 6.2 donne la composition des différentes pâtes du liant binaire destinées à l'optimisation de dosage en superplastifiant.

Tableau 6.2 : Composition des pâtes du liant binaire de l'optimisation de dosage en superplastifiant

Pâte - Nature de liant		100% c	30% fc	30% pn	40% lg
Ciment	(cm ³)	100	70	70	60
	(g)	310	217	217	186
Addition minérale	(cm ³)	0	30	30	40
	(g)	0	75	82	111
Eau efficace	(cm ³)	77.5	77.5	77.5	77.5
Liant	(cm ³)	100	100	100	100
	(g)	310	292	299	297
Rapport e/l		0.775	0.775	0.775	0.775
Rapport E/L		0.250	0.265	0.259	0.261
Volume total	(cm ³)	177.5	177.5	177.5	177.5
Masse totale	(g)	387.5	369.5	376.5	374.5
Superplastifiant (%)		0 - 0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.5 - 0.6 - 0.7			

La Fig. 6.6 représente la variation de l'étalement relatif de la pâte de liant binaire en fonction de dosage en superplastifiant. On remarque d'abord que le dosage incrémenté en superplastifiant augmente généralement l'étalement de la pâte, peu importe le type de liant. Les liants de 30% filler, 30% pouzzolane et 40% laitier, présentent un palier de saturation de $SP^* = 0.5\%$ qui est plus faible que celui de 100% ciment de $SP^* = 0.6\%$.

En effet, les fines additions consomment peu de quantité de superplastifiant par rapport au ciment. En comparant les étalements des pâtes contenant différents types de liant, on constate que les pâtes de 30% filler puis 30% pouzzolane ayant des étalements plus grands que celle de 100% ciment, tandis que la pâte de 40% laitier s'étale moins que celle de 100% ciment. Il pourrait être que la fluidité dépend donc de la nature et la forme de l'addition contenant dans le liant.

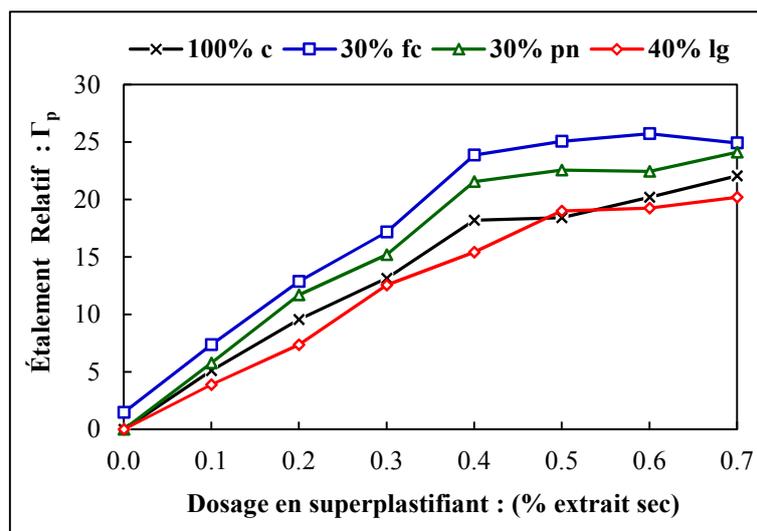


Figure 6.6 : Étalement relatif de la pâte du liant binaire en fonction de dosage en superplastifiant pour différentes additions minérales

6.4 Optimisation à l'échelle du mortier

Le BAPHP peut être considéré comme matériau biphasique dans lequel les graviers sont suspendus dans un mortier très fluide. Les propriétés rhéologiques et mécaniques de BAPHP sont principalement gouvernées par celles de mortier et un volume adéquat de graviers [Yahia & al.]. D'après plusieurs chercheurs, pour un type et un volume de sable donnés, le comportement du mortier destiné au BAPHP est fortement influencé par le type et le volume des additions minérales utilisés [Nepomuceno & al.] [Vivek & Dhinakaran].

Dans cette séquence, l'optimisation du mortier est réalisée en trois phases. Elle consiste d'abord à développer un mortier autoplaçant à hautes performances (MAPHP) de référence qui sert à l'optimisation rhéologique et mécanique. Ensuite, la fluidité de

mortier de ciment a été évaluée, par deux grandeurs (étalement et écoulement), afin de déterminer le besoin en eau et en superplastifiant. Puis, l'effet de l'incorporation de différentes additions minérales sur la fluidité du mortier en fonction de différents dosages en superplastifiant a été déterminé. À l'état durci, l'analyse de la variation de la résistance à la compression en fonction de types et teneurs en additions minérales a été enfin effectuée par les notions de l'indice de l'activité et le facteur d'efficacité.

6.4.1 Développement du MAPHP de référence

Le mortier normal défini par la norme [NF EN 196-1] contenant de proportions massiques (3 Sable + 1 Ciment + 0.5 Eau) ne répond pas aux exigences de l'autoplaçance, à savoir la haute fluidité. En plus, il ne donne pas toujours le même volume unitaire qui dépend bien sûr des densités absolues des constituants. Il est évident par exemple que le volume absolu du liant binaire croît en fonction de taux de substitution du ciment par l'addition, et par conséquent la compacité du mortier frais diminue. Ces modifications peuvent influencer directement les résistances mécaniques [Bessa-Badreddine] [Boudchicha].

C'est pourquoi, on a besoin d'un mortier standard pour le BAPHP. À cet effet, nous proposons un mortier autoplaçant à hautes performances MAPHP de référence qui sert à la formulation du BAPHP. Il est inspiré des mortiers d'[Okamura & Ozawa] et [Domone¹] et se base sur l'approche volumique, avec les proportions volumiques de constituants suivantes ;

$$2 \text{ sable} + 1 \text{ liant} + 1 \text{ eau} = 50\% \text{ sable} + 25\% \text{ liant} + 25\% \text{ eau}$$

Ensuite, l'incorporation du ciment et des additions minérales dans le MAPHP se fait par volume de liant ;

$$\text{liant} = \text{ciment} + \text{addition minérale}$$

Enfin, le MAPHP est dosé en superplastifiant selon les critères de la maniabilité ciblés par les essais sur le mortier au mini-cône de Haegermann et mini-entonnoir. Le dosage en superplastifiant est exprimé par ;

$$\text{superplastifiant} = \% \text{ en extrait sec de la masse du liant}$$

Le volume d'eau considéré est le volume d'eau efficace qui inclut l'eau de gâchage et l'eau ramenée par le superplastifiant, et exclut l'eau absorbée par le sable.

Il est à noter que tous les grains de sable de diamètre inférieur à 80 μm sont considérés comme fines, et tous les grains du liant de diamètre supérieur à 80 μm sont considérés comme sable. Toutefois, il est logique d'ignorer ces quantités lorsqu'elles sont moins de 2% de constituants.

Le MAPHP de référence proposé est facile dans sa formulation. Il favorise également le volume de sable et permet donc d'économiser la quantité du liant de constituants coûteux, le ciment et les additions, et d'améliorer les performances mécaniques. La formulation du MAPHP de référence à base de ciment avec les constituants de l'étude est donnée dans le Tab. 6.3.

Tableau 6.3 : Formulation de MAPHP de référence à base de ciment

Constituants	Volume (l/m³)	Masse (kg/m³)
sable 0.08/3 mm	500	1 270
liant - 100% ciment 0/0.08 mm	250	775
eau	250	250
superplastifiant	% en extrait sec de la masse du liant	
total	1 000	2 295
Fractions		
sable/mortier	0.50	0.55
liant/mortier	0.25	0.34
eau/mortier	0.25	0.11
Rapports		
sable/liant	2.00	1.64
eau/liant	1.00	0.32
eau/sable	2.00	5.08
sable/pâte	1.00	1.24

6.4.2 Optimisation rhéologique du MAPHP

6.4.2.1 Besoin en eau et en superplastifiant du MAPHP de ciment

Dans cette étape, nous allons étudier la fluidité du mortier à base de ciment en évaluant le besoin en eau et en superplastifiant. L'efficacité de superplastifiant à réduire le besoin en eau pour une fluidité donnée a été également évaluée. Nous cherchons également à déterminer un couple optimum de l'étalement relatif et la vitesse relative de l'écoulement caractérisant la meilleure fluidité du MAPHP à base de ciment.

Les mortiers confectionnés sont à base du MAPHP de référence avec quatre rapports e/c variant dans la plage de hautes performances de 0.8 à 1.1, par pas de 0.1, correspondant aux rapports massiques E/C de 0.258 à 0.355, par pas de 0.0323. Le superplastifiant est injecté dans les mortiers par doses croissantes de 0 à 0.7%, par incrémentation de 0.1%. Le Tab. 6.4 donne la formulation de différents MAPHP du ciment, en fonction de rapport e/c , destinés à l'optimisation rhéologique.

Après la formulation, nous avons procédé à une campagne de deux essais conjointement sur mortier ; l'étalement au mini-cône de Haegermann et l'écoulement au mini-entonnoir. Il convient de rappeler que l'étalement relatif est : $\Gamma_m = (SF_m/100)^2 - 1$, où SF_m est l'étalement en (mm) et le temps relatif d'écoulement est : $\text{Log}(T_m)$, où T_m est le temps d'écoulement en (sec).

Tableau 6.4 : Formulation des MAPHP du ciment pour l'optimisation rhéologique

e/c		0.8	0.9	1	1.1
Sable	(l)	500	500	500	500
	(kg)	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment	(l)	277.78	263.16	250.00	238.10
	(g)	861.12	815.80	775	738.11
Eau	(l)	222.22	236.84	250.00	261.90
Rapport e/c		0.8	0.9	1	1.1
Rapport E/C		0.258	0.290	0.323	0.355
Volume total	(l)	1 000	1 000	1 000	1 000
Masse totale	(kg)	2 353.34	2 322.64	2 295.00	2 270.01
Superplastifiant (%)		0 - 0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.5 - 0.6 - 0.7			

La Fig. 6.7 représente l'étalement relatif Γ_m et le temps de l'écoulement relatif $\text{Log}T_m$ du MAPHP de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports e/c .

Concernant le besoin en eau, l'introduction de l'eau améliore systématiquement la fluidité du mortier, en augmentant l'étalement relatif et en réduisant le temps relatif de l'écoulement. L'étalement et l'écoulement du mortier non adjuvanté (0%SP) ne se produisent jamais quelle que soit la teneur en eau utilisée. Pour la teneur en eau maximale ($e/c = 1.1$), les paramètres Γ_m et $\text{Log}T_m$ ne se déclenchent qu'avec un dosage en superplastifiant de 0.1%. Ces faibles quantités d'eau dans le mortier ne sont pas suffisantes à lubrifier et à disperser les fines de ciment pour fluidifier le mélange.

La variation de la fluidité de mortier en fonction de la teneur en eau n'est pas uniforme pour tous les dosages en superplastifiant. Par exemple, dans le cas de mortier faiblement dosé en superplastifiant (0.2%SP), l'augmentation de rapport e/c de 0.8 à 1.1 entraîne des améliorations de Γ_m et $\text{Log}T_m$ environ de 3.20 et 0.32 respectivement. Alors que dans le mortier fortement dosé en superplastifiant (0.7%SP), la même augmentation de rapport e/c développe des améliorations plus faibles de Γ_m et $\text{Log}T_m$ environ de 2.61 et 0.18 respectivement. L'efficacité de l'eau à fluidifier le mélange de mortier est donc d'autant plus importante que le dosage en superplastifiant est faible.

Concernant le besoin en superplastifiant, l'ajout de superplastifiant améliore également la fluidité de mortier pour toutes les teneurs en eau. En effet, l'étalement relatif augmente et le temps relatif de l'écoulement diminue en fonction de dosage en superplastifiant, jusqu'à des valeurs maximales et minimales, au-delà desquelles, le superplastifiant n'entraîne pas d'amélioration supplémentaire de la fluidité. La dose de saturation SP* mesurée par deux essais s'est avérée égale à 0,6% pour tous les rapports e/c . Nous avons donc confirmé la même dose SP* pour la pâte de ciment. Les plus importantes améliorations de Γ_m et $\text{Log}T_m$ ont obtenues dans la fourchette de dosage en superplastifiant de 0 à 0.4% pour tous les rapports e/c , ce qui confirme également le palier de l'efficacité de superplastifiant de la pâte de ciment.

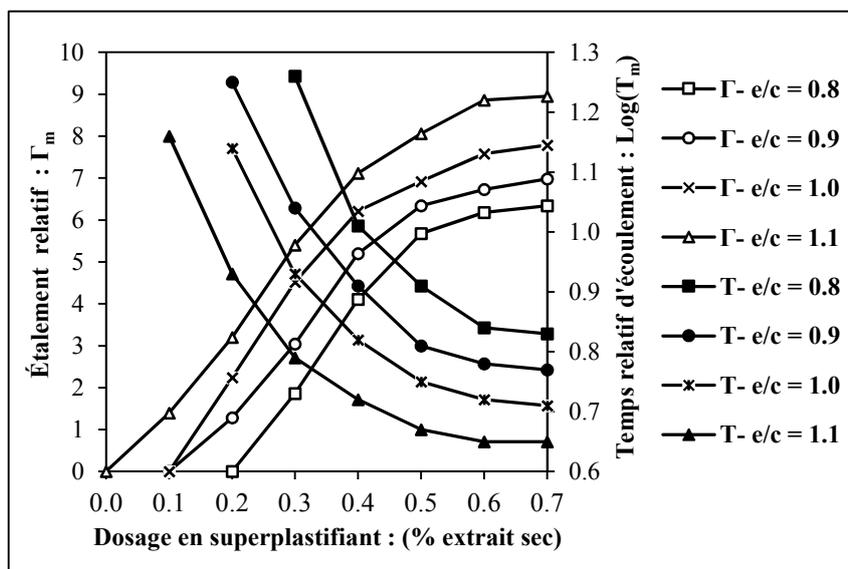


Figure 6.7 : Étalement relatif Γ_m et temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ du MAPH de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports e/c

La variation de la fluidité de mortier en fonction du dosage en superplastifiant n'est pas également uniforme pour toutes les teneurs en eau. À titre d'exemple, pour le mortier ayant un faible rapport $e/c = 0.8$, l'augmentation de dosage en superplastifiant de 0.3 à 0.7 croît Γ_m de 4.48 et diminue $\text{Log}T_m$ de 0.43. Tandis que, pour le mortier ayant un fort rapport $e/c = 1.1$, la même augmentation de la dose en superplastifiant croît Γ_m de 3.55 et diminue $\text{Log}T_m$ de 0.14 seulement. L'effet de dispersion du superplastifiant est donc d'autant plus important que la teneur en eau est faible dans le mortier.

Couple adéquat (superplastifiant-eau) : Comme le montre la Fig. 6.8, la relation est linéaire entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ du MAPHP de ciment en fonction de rapport e/c pour différents dosages constants en superplastifiant. Toutes les droites de régressions linéaires possèdent de bons coefficients de détermination R^2 de corrélation supérieurs à 0.96, ce qui est en accord avec la linéarisation de [Okamura & Ozawa] pour le mortier autoplaçant. Réciproquement dans le MAPHP, la Fig. 6.9 montre une autre relation linéaire entre Γ_m et $\text{Log}T_m$ mais en fonction de dosage en superplastifiant pour différents rapports constants e/c . Le coefficient de détermination R^2 de corrélation de linéarité est supérieur à 0.94 pour toutes les droites. On peut déterminer, pour chaque Γ_m et pour chaque $\text{Log}T_m$, la teneur en eau et le dosage en superplastifiant. Il est donc possible de trouver un couple adéquat (eau-superplastifiant) permettant de fluidifier de manière optimale le MAPHP.

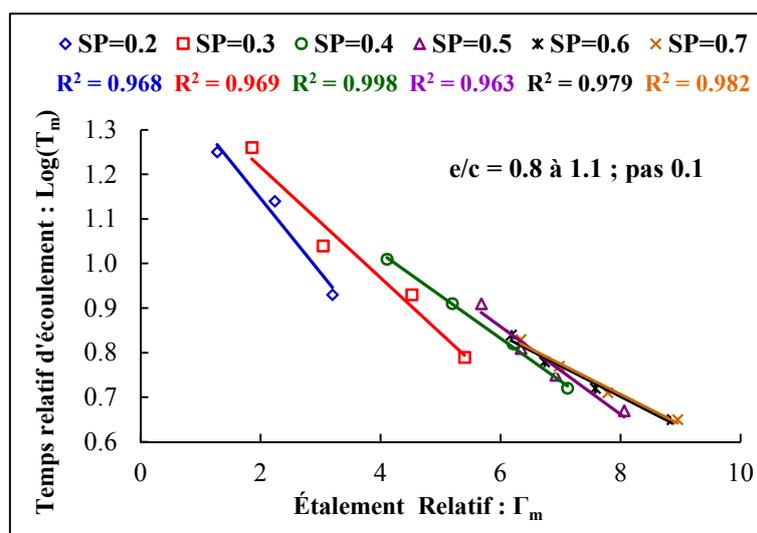


Figure 6.8 : Corrélation linéaire entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ du MAPHP de ciment en fonction de rapport e/c pour dosages constants en superplastifiant

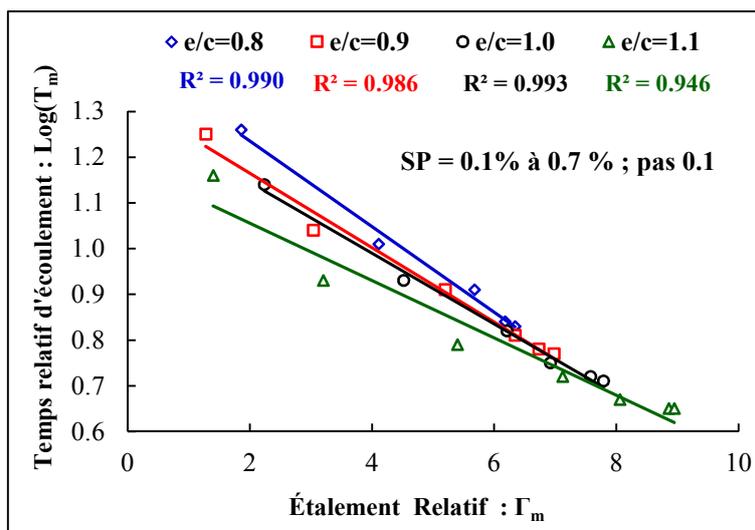


Figure 6.9 : Corrélation linéaire entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ du MAPHP de ciment en fonction de dosage en superplastifiant pour rapports constants e/l

Couple optimal (Γ_m ; $\text{Log}T_m$) : La Fig. 6.10 représente la variation de la demande en eau en fonction de dosages en superplastifiants pour des fluidités données exprimées par des couples ; étalement relatif et temps d'écoulement relatif (Γ_m ; $\text{Log}T_m$). Dans la Fig. 6.8, le premier couple de la fluidité ($\Gamma_m = 5$; $\text{Log}T_m = 1$) est le couple optimal proposé par [Okamura & Ozawa] pour avoir un meilleur comportement rhéologique de mortier. On peut remarquer que les deux courbes de modèle [Okamura & Ozawa] sont divergentes vis-à-vis de besoin en eau, et notamment pour les dosages faibles en superplastifiant.

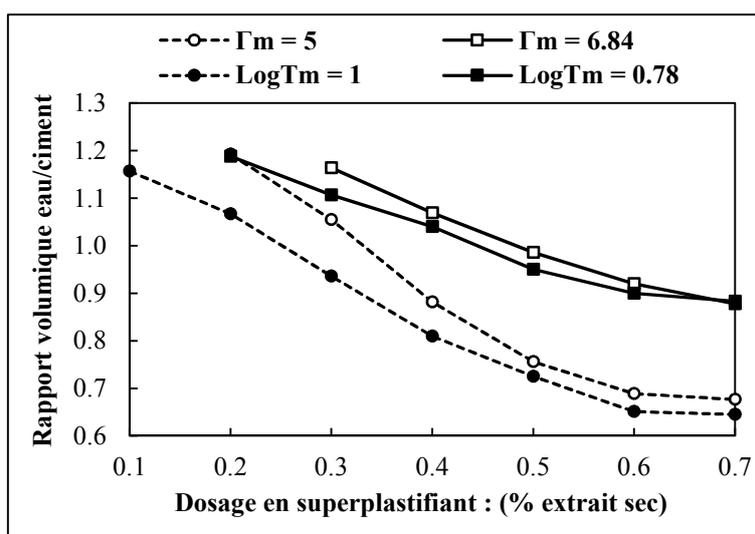


Figure 6.10 : Besoin en eau du MAPHP du ciment pour des fluidités données en fonction de dosage en superplastifiant

Après le traitement de résultats obtenus, on estime que le couple de la fluidité ($\Gamma_m = 6.84$; $\text{Log}T_m = 0.78$) est optimal pour donner un meilleur comportement rhéologique de MAPH. Les valeurs du couple proposé correspondent à un étalement du mortier $SF_m = 280$ mm et à un temps d'écoulement du mortier $T_m = 6$ sec. Bien que le couple proposé nécessite plus d'eau, mais il offre des comportements presque identiques au mortier vis-à-vis de l'étalement au mini-cône et de l'écoulement au mini-entonnoir grâce à la convergence obtenue. En plus, les valeurs de couple proposé poussent plus vers une haute fluidité tout en conservant la stabilité de mortier.

6.4.2.2 Fluidité du MAPH avec additions minérales

Après l'optimisation rhéologique du MAPH à base de ciment, nous poursuivons la détermination de l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}(T_m)$ de MAPH à base de différents types et teneurs des additions minérales pour différents dosage en superplastifiant. Cette étape consiste donc à améliorer d'autant plus la fluidité de MAPH en incorporant les additions minérales locales (filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé).

En se basant sur le MAPH de référence avec 100% ciment, nous avons également confectionné des mortiers contenant différentes additions incorporées par substitution volumique progressive du ciment avec des teneurs de 15, 30 et 45%. Le rapport e/l est bien sûr 1 et le dosage en superplastifiant est incrémenté de 0.2 à 0.7%, par dose unitaire de 0.1%. Les Tabs. 6.5 & 6.6 & 6.7 regroupent les formulations de différents MAPH à base des additions, destinées à l'optimisation rhéologique.

Pour un rapport e/l constant, l'incorporation des additions minérales par substitution progressive de ciment volume par volume permet de préserver le même volume absolu du liant binaire, ciment et addition, et par conséquent le volume total de mortier reste constant. Par cette méthodologie, la fluidité du MAPH est influencée principalement par l'effet physique granulaire produit par la présence des additions minérales pour chaque dosage en superplastifiant. Cette technique est bien adoptée pour le mortier ordinaire [Bessa-Badreddine] [Boudchicha].

L'effet granulaire peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs tels que ; la forme, la texture, la finesse et la granulométrie des fines d'addition utilisées.

L'effet favorable est produit lorsque les fines des additions viennent limiter le frottement intergranulaire, corriger la distribution granulométrique et remplir les vides intergranulaires en augmentant la compacité et en libérant l'eau piégée. Il conduit par conséquent à l'amélioration de la fluidité du mortier pour des quantités constantes en eau et en superplastifiant. Par contre, l'effet défavorable peut résulter lorsque les fines des additions n'arrivent pas à modifier favorablement l'empilement granulaire.

Tableau 6.5 : Formulation des MAPHP du filler calcaire pour l'optimisation rhéologique

Nature de liant		100%c	15%fc	30%fc	45%fc
Sable	(l)	500	500	500	500
	(kg)	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment	(l)	250	212.5	175.0	137.5
	(kg)	775	658.75	542.5	426.25
Filler Calcaire	(l)	0	37.5	75	112.5
	(kg)	0	93.75	187.5	281.25
Eau efficace	(l)	250	250	250	250
Liant	(l)	250	250	250	250
	(kg)	775	752.5	730	707.5
Rapport e/l		1	1	1	1
Rapport E/L		0.323	0.332	0.342	0.353
Volume total	(l)	1000	1000	1000	1000
Masse totale	(kg)	1 525	1 502.5	1 480	1 457.5
Superplastifiant (%)		0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.5 - 0.6 - 0.7			

Tableau 6.6 : Formulation des MAPHP de la pouzzolane naturelle pour l'optimisation rhéologique

Nature de liant		100%c	15%pn	30%pn	45%pn
Sable	(l)	500	500	500	500
	(kg)	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment	(l)	250	212.5	175	137.5
	(kg)	775	658.75	542.5	426.25
Pouzzolane naturelle	(l)	0	37.5	75	112.5
	(kg)	0	102.375	204.75	307.125
Eau efficace	(l)	250	250	250	250
Liant	(l)	250	250	250	250
	(kg)	775	761.125	747.25	733.375
Rapport e/l		1	1	1	1
Rapport E/L		0.323	0.328	0.335	0.341
Volume total	(l)	1000	1000	1000	1000
Masse totale	(kg)	1 525	1 511.125	1 497.25	1 483.375
Superplastifiant (%)		0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.5 - 0.6 - 0.7			

Tableau 6.7 : Formulation des MAPHP du laitier granulé pour l'optimisation rhéologique

Nature de liant		100% c	15% lg	30% lg	45% lg
Sable	(l)	500	500	500	500
	(kg)	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment	(l)	250	212.5	175	137.5
	(kg)	775	658.75	542.50	426.25
Laitier granulé	(l)	0	37.5	75	112.5
	(kg)	0	104.25	208.50	312.75
Eau efficace	(l)	250	250	250	250
Liant	(l)	250	250	250	250
	(kg)	775	763	751	739
Rapport e/l		1	1	1	1
Rapport E/L		0.323	0.328	0.333	0.338
Volume total	(l)	1000	1000	1000	1000
Masse totale	(kg)	1 525	1 513	1 501	1 489
Superplastifiant (%)		0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.5 - 0.6 - 0.7			

Les Figs. 6.11 & 6.12 & 6.13 représentent conjointement les valeurs de l'étalement relatif et du temps relatif d'écoulement du MAPHP à base de différents teneurs en filler, pouzzolane et laitier respectivement en fonction de dosage en superplastifiant. D'abord, L'examen visuel des galettes d'étalements permet de considérer l'homogénéité de tous les mortiers quel que soit le diamètre de l'étalement. Ainsi, il n'y a aucun blocage lors de l'écoulement des mortiers dans le mini-entonnoir.

Peu importe le type et la teneur en addition, l'ajout de superplastifiant augmente l'étalement relatif et réduit le temps relatif d'écoulement, et notamment lorsque sa dose est de 0.2 à 0.5%. Pour tous les types d'additions, le palier de saturation de superplastifiant SP* est atteint à une dose de 0.6% pour 100% ciment et 15% additions, tandis qu'il est réduit à une dose de 0.5% pour 30 et 45% additions. En effet, l'addition minérales influencent la demande en superplastifiant pas leur nature, leur teneur et leur finesse. Les additions minérales, ayant une finesse plus faible que celle de ciment, absorbent donc peu de superplastifiant. On peut estimer que la dose de saturation SP* est une fonction décroissante à la teneur en addition minérale.

Par ailleurs, on peut remarquer que les grandeurs de la fluidité de MAPHP à base des additions minérales sont très influencées par leur nature et leur teneur incorporée dans le liant. Cependant, le comportement de la fluidité est similaire puisque ses courbes Γ_m et

$\text{Log}(T_m)$ en fonction de dosage en superplastifiant prennent les mêmes allures pour tous les types d'additions.

Pour le mortier contenant le filler calcaire, la teneur de 30%fc présente les meilleures valeurs de l'étalement relatif, puis 15%fc donne également des étalements plus élevés que ceux de 100%c. Tandis que 45%fc ayant des étalements plus faibles que ceux de 100%c. D'autre part, les temps relatifs d'écoulement croissent légèrement à l'incorporation de fillers dans le liant. La teneur de 100%c donne donc les temps d'écoulement les plus rapides par rapports aux teneurs de filler. Cette amélioration de la fluidité est due au fait que l'introduction de filler calcaire peut apporter un empilement granulaire plus optimisé par un arrangement spatial des fines dans le mélange et une réduction des frottements intergranulaires.

Pour le mortier contenant la pouzzolane naturelle, sa fluidité en fonction de taux de substitution de ciment est similaire à celle de mortier à base filler qui offre, cependant, des améliorations plus importantes. En effet, la teneur de 30%pn présente les meilleurs étalements relatifs, et même 15%pn donne des étalements plus importants que ceux de MAPHF de référence de 100%c. Alors que la teneur de 45%pn développe des étalements plus faibles par rapport à ceux du mortier de référence. En outre, les temps relatifs d'écoulement augmentent avec la substitution de ciment par la pouzzolane. Le comportement du MAPHF à base de pouzzolane similaire à celui de filler calcaire indique également une optimisation de l'empilement granulaire par les fines de pouzzolane, mais moins accentuée.

Pour le mortier contenant le laitier granulé, les étalements relatifs augmentent légèrement pour une faible teneur de 15%lg, tandis que toute augmentation au-delà de cette teneur provoque une réduction significative des étalements. En effet, la teneur de 45%lg présente les plus faibles valeurs de l'étalement, puis 30%lg développe également des étalements moins que ceux de 100%c. De plus, les temps relatifs d'écoulement croissent de façon significative avec l'incorporation de laitier dans le liant. Le comportement particulier du MAPHF avec de laitier granulé est probablement dû à l'irrégularité et à l'aspect poreux de ses grains, qui n'arrivent plus à remplir les vides intergranulaire, ou qui demandent une lubrification très importante par absorption de plus d'eau afin d'assurer leur dispersion dans le mélange.

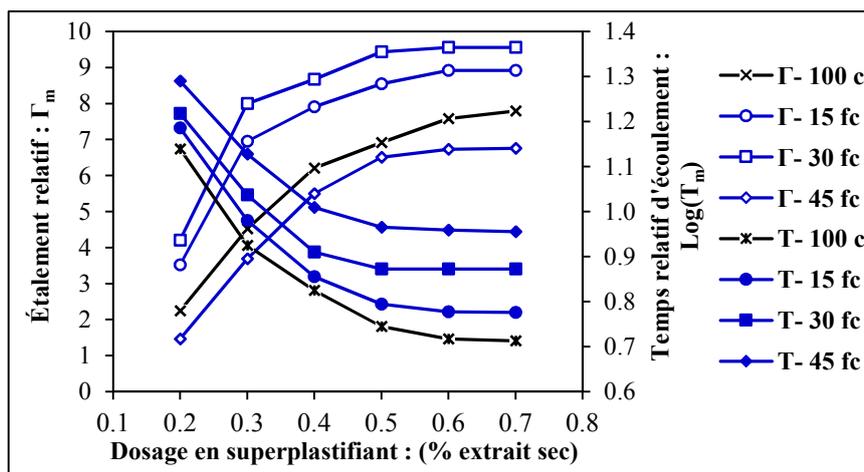


Figure 6.11 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHG à base des différentes teneurs en filler calcaire en fonction de dosage en superplastifiant

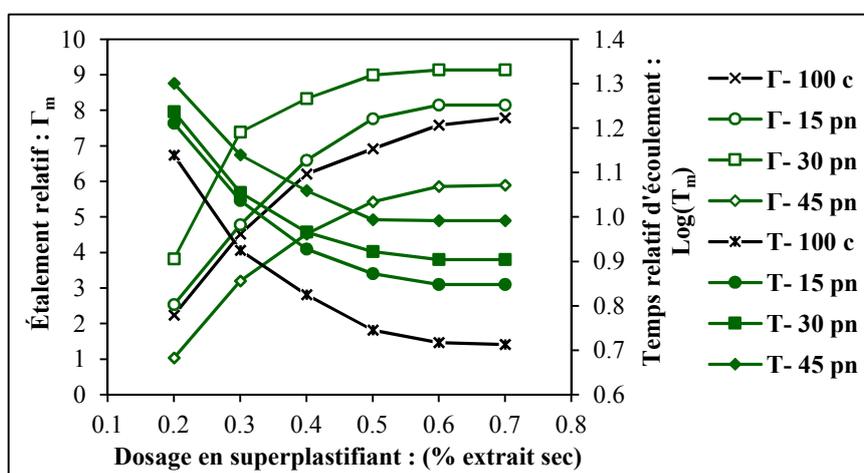


Figure 6.12 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHG à base des différentes teneurs en pouzzolane naturelle en fonction de dosage en superplastifiant

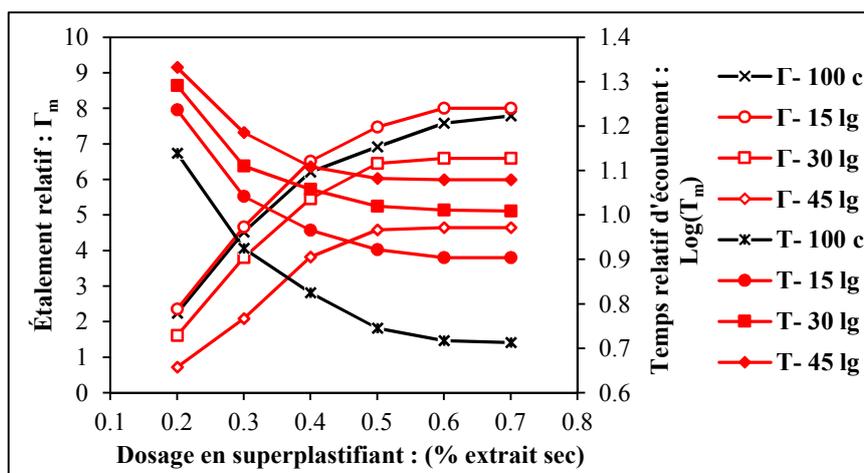


Figure 6.13 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHG à base des différentes teneurs en laitier granulé en fonction de dosage en superplastifiant

La Figure 6.14 représente l'étalement relatif et le temps relatif d'écoulement du MAPHF en fonction de teneur de différentes additions minérales pour la dose de saturation en superplastifiant SP*. L'incorporation des additions minérale à des teneurs modérés ou faibles (30%fc ; 30%pn ; 15%lg) dans le liant entraîne des améliorations optimales aux étalements relatifs. Au-delà de ces teneurs optimales, les étalements relatifs diminuent considérablement avec l'augmentation des teneurs d'additions. Cependant, les temps relatifs d'écoulement sont des fonctions croissantes de l'ajout des additions en substituant le ciment, ce qui signifie l'augmentation de la viscosité de MAPHF. Cette augmentation est plus marquée par le laitier par rapport le filler et la pouzzolane qui présentent une légère augmentation. Ceci suggère que l'incorporation des additions aux teneurs optimales dans le MAPHF améliore sa fluidité, puis il devient plus ferme à plus fortes teneurs de substitution.

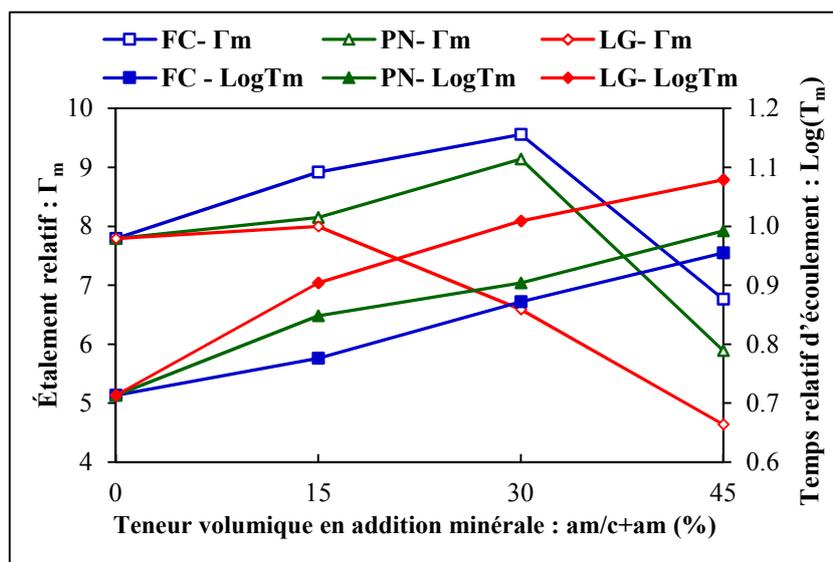


Figure 6.14 : Étalement relatif et temps relatif d'écoulement du MAPHF en fonction de teneur de différentes additions minérales pour la dose de saturation en superplastifiant SP*

Pour un type donné d'addition, son effet physique granulaire dans le MAPHF est associé au dosage en superplastifiant. En effet, le superplastifiant contrôle le volume des vides intergranulaire par une dispersion des fines d'additions pour mieux remplir le système à l'état frais et assurer une la contribution idéale de l'eau de gâchage. Ces modifications de mécanisme augmentent à la fois la densité, la fluidité et la stabilité du MAPHF. Cependant, toute incorporation excessive des additions supérieure à la teneur optimale, à laquelle une compacté maximale est atteinte, peut entraîner une augmentation consistante

de la viscosité ou une augmentation de la demande en eau pour atteindre une fluidité donnée. Cette limite est déterminée par le volume libre des vides intergranulaires dans lequel les fines ajoutées peuvent être empilées. L'augmentation de la viscosité au-delà de cette limite peut également s'expliquer par l'augmentation du frottement intergranulaire due à l'augmentation du contact des grains solides entre eux [Yahia & al.].

Comme le montre la Fig. 6.15, il existe des relations linéaires entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ des MAPHP à base de ciment et d'additions minérales pour différents dosages en superplastifiant et rapport $e/c = 1$. Toutes les droites de régressions linéaires possèdent de bons coefficients de détermination R^2 de corrélation supérieurs à 0.81.

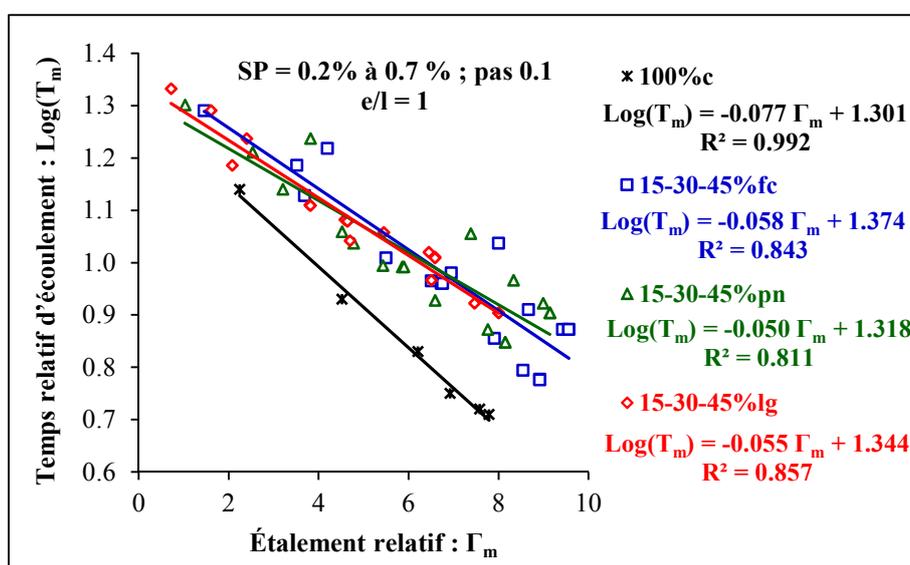


Figure 6.15 : Corrélation linéaire entre l'étalement relatif Γ_m et le temps relatif d'écoulement $\text{Log}T_m$ des MAPHP à base du ciment et d'additions minérales pour différents dosages en superplastifiant

Le comportement de fluidité des MAPHP à base de différentes additions minérales est presque identique quel que soit le type utilisé (filler, pouzzolane ou laitier). Il est bien distingué à celui du MAPHP à base de ciment par décalage de droites de corrélation des additions vers le haut par rapport à la droite de ciment. Pour un étalement relatif donné, le temps d'écoulement relatif devient plus long par l'introduction des additions dans le liant, ce qui confère donc une stabilité accrue au MAPHP à fluidité fixe. Réciproquement, pour un temps relatif d'écoulement donné, l'étalement relatif devient plus grand par l'incorporation des additions, ce qui donne des MAPHP plus fluides ayant une viscosité fixe. Encore, pour un couple donné de $(\Gamma_m ; \text{Log}T_m)$, les additions minérales peuvent

diminuer la demande en superplastifiant de MAPHHP ayant un rapport e/l fixe. L'effet physique granulaire des additions minérales est donc bien démontré dans le MAPHHP.

Il convient de noter que les teneurs optimales obtenues par cette étude sont valables pour les types d'additions minérales et le superplastifiant utilisés dans le MAPHHP. La méthodologie présentée peut être utilisée comme un ensemble de recommandations qui facilite la procédure de l'optimisation rhéologique de MAPHHP et de la formulation de BAPHP. Elle se base sur une conception appropriée de la matrice cimentaire dans le mortier qui assure le développement de bonnes fluidités et stabilités de MAPHHP.

6.4.3 Optimisation mécanique du MAPHHP avec additions minérales

Pour un rapport e/l constant, l'incorporation des additions minérales dans le liant par substitution progressive de ciment volume par volume engendre certainement une variation de la résistance caractéristique à la compression à 28 jours du MAPHHP. Le mécanisme des modifications de la résistance à la compression engendrées par l'incorporation d'additions minérales s'avère compliqué. Cependant, les études antérieures concernant ce sujet s'accordent à distinguer trois effets superposés influant les résistances mécaniques des matériaux cimentaires, qui sont ; un effet physique granulaire, un effet physico-chimique microstructural et un effet chimique [Bessa-Badreddine] [Boudchicha].

Dans cette étape, nous allons étudier cette résistance en fonction de l'incorporation de différents types d'additions minérales. Nous allons également analyser l'indice d'activité en fonction des teneurs en addition afin d'aboutir aux modèles prédictif des résistances à la base de facteur d'efficacité de ces additions.

En se basant sur le MAPHHP de référence, nous avons confectionné des mortiers par l'incorporation volumique des additions minérales, en substituant le ciment, avec des teneurs progressives de 0 à 50%, par teneur unitaire de 10%. Les mortiers sont adjuvantés par la dose de saturation en superplastifiant SP* correspondante au liant binaire utilisé. Le rapport $e/l = 1$ est bien sûr égal 1.

Les Tabs. 6.8 & 6.9 & 6.10 regroupent les dosages de différents MAPHHP à base des additions, destinés à l'optimisation mécanique.

Tableau 6.8 : Dosages de MAPHP à base de filler calcaire pour l'optimisation mécanique

Teneur fc/c+fc : (%)	0	10	20	30	40	50
Sable : (kg)	1 270	1 270	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment : (kg)	775.0	697.5	620.0	542.5	465.0	387.5
Filler calcaire : (kg)	0.0	62.5	125.0	187.5	250.0	312.5
Eau efficace	250	250	250	250	250	250
Liant : (kg)	775	760	745	730	715	700
Rapport e/l	1	1	1	1	1	1
Rapport E/L	0.323	0.329	0.336	0.342	0.350	0.357
Dosage en SP* : (%)	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
Superplastifiant : (kg)	4.7	4.6	4.5	3.7	3.6	3.5
Masse totale : (kg)	1 529.7	1 514.6	1 499.5	1 483.7	1 468.6	1 453.5

Tableau 6.9 : Dosages de MAPHP à base de pouzzolane pour l'optimisation mécanique

Teneur pn/c+pn : (%)	0	10	20	30	40	50
Sable : (kg)	1 270	1 270	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment : (kg)	775.0	697.5	620.0	542.5	465.0	387.5
Pouzzolane naturelle : (kg)	0.0	68.3	136.5	204.8	273.0	341.3
Eau efficace	250	250	250	250	250	250
Liant : (kg)	775	766	757	747	738	729
Rapport e/l	1	1	1	1	1	1
Rapport E/L	0.323	0.326	0.330	0.335	0.339	0.343
Dosage en SP* : (%)	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
Superplastifiant : (kg)	4.65	4.60	4.54	3.74	3.69	3.65
Masse totale : (kg)	1 529.7	1 520.6	1 511.5	1 500.7	1 491.7	1 482.7

Tableau 6.10 : Dosages de MAPHP à base de laitier granulé pour l'optimisation mécanique

Teneur lg/c+lg : (%)	0	10	20	30	40	50
Sable : (kg)	1 270	1 270	1 270	1 270	1 270	1 270
Ciment : (kg)	775.0	697.5	620.0	542.5	465.0	387.5
Laitier granulé : (kg)	0.0	69.5	139.0	208.5	278.0	347.5
Eau efficace	250	250	250	250	250	250
Liant : (kg)	775	767	759	751	743	735
Rapport e/l	1	1	1	1	1	1
Rapport E/L	0.323	0.326	0.329	0.333	0.336	0.340
Dosage en SP* : (%)	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
Superplastifiant : (kg)	4.65	4.60	4.55	3.76	3.72	3.68
Masse totale : (kg)	1 529.7	1 521.6	1 513.6	1 504.8	1 496.7	1 488.7

6.4.3.1 Résistance à la compression à 28 jours du MAPHP avec additions minérales

La Fig. 6.16 représente la variation de la résistance à la compression à 28 jours du MAPHP en fonction de différents types et teneurs en additions minérales. On peut remarquer que cette résistance caractéristique est sensiblement influencée par le type et la teneur d'addition incorporée dans le liant.

Pour le MAPHP contenant le filler calcaire, la résistance à la compression croît légèrement pour une faible teneur de 10%fc en aboutissant à la meilleure valeur obtenue pour toutes les additions, puis elle commence de décroître proportionnellement aux teneurs de substitution du ciment par le filler de 10% à 50%fc. Cette réduction est intermédiaire par rapport aux autres additions de pouzzolane et laitier. Ce gain minime de la résistance à la compression à 28 jours pour une faible teneur de filler est dû à son effet physique du remplissage qui augmente, en présence d'eau et de superplastifiant, la compacité et la maniabilité du mortier, ainsi à son effet microstructural de surface qui favorise le processus de l'hydratation du ciment à jeune âge par une multiplication des sites préférentiels de nucléation.

Pour le MAPHP contenant la pouzzolane naturelle, la résistance à la compression diminue d'abord légèrement pour des faibles teneurs jusqu'à 20%pn, puis elle continue de diminuer mais considérablement à l'incorporation de pouzzolane de 20% à 50%pn. Cette diminution est la plus accentuée par rapport aux autres additions de filler et laitier. Elle est due à la modification de la microstructure de la matrice cimentaire et non développement de l'action pouzzolanique à moyen terme de 28 jours.

Pour le MAPHP contenant le laitier granulé, la résistance à la compression se maintient aux faibles teneurs jusqu'à 20%lg, puis elle commence de diminuer légèrement aux teneurs progressives de 20% à 40%lg et termine par une diminution consistante pour une substitution très élevées du ciment par le laitier de 50%lg. Cette décroissance est la plus faible par rapport aux autres additions de filler et pouzzolane. La conservation de la résistance à la compression pour des faibles teneurs en laitier et la limitation de chute de cette résistance pour forte teneur en laitier est due à sa propriété hydraulique latente qui peut être précédée à moyen terme.

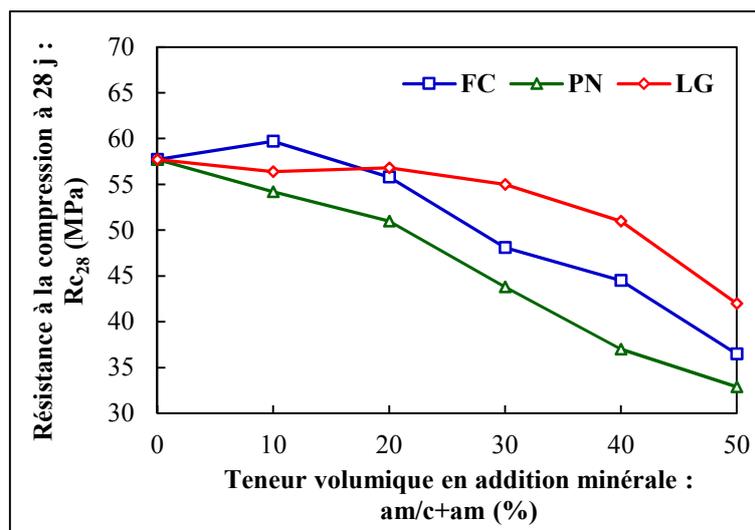


Figure 6.16 : Résistance à la compression à 28 j du MAPHF en fonction des additions minérales

6.4.3.2 Indice d'activité à 28 jours du MAPHF avec additions minérales

Afin de mieux analyser l'influence des additions minérales sur la résistance à la compression du MAPHF, nous avons introduit la notion de l'indice d'activité i_{28} qui exprime l'apport relatif de la résistance à la compression du mortier avec addition par rapport au mortier sans addition. Dans cette étude, l'indice d'activité est défini par le rapport entre la résistance à la compression à 28 jours du MAPHF dont le ciment est substitué par une teneur donnée (p) en addition minérale, notée $Rc_{28}(p)$, et la résistance du MAPHF de référence qui contient uniquement du ciment, notée $Rc_{28}(0)$. Il s'écrit par l'équation suivante ;

$$i_{28}(p) = \frac{Rc_{28}(p)}{Rc_{28}(0)}$$

La Fig. 6.17 représente les fonctions de l'indice d'activité à 28 jours des teneurs de différents types d'additions minérales dans le MAPHF. On peut remarquer qu'il existe des fonctions polynomiales du second degré entre l'indice d'activité à 28 jours des teneurs en additions minérales. Toutes les fonctions de régressions possèdent des meilleurs coefficients de détermination R^2 de corrélations supérieurs ou égaux à 0.96.

Pour le filler calcaire et la pouzzolane naturelle, l'indice d'activité est une fonction décroissante des teneurs de substitution du ciment de 0% à 50%fc ou 50%pn. Cet indice d'activité atteint des chutes de 0.63 et 0.57 pour les teneurs de 50%fc et 50%pn respectivement.

Pour le laitier granulé, l'indice d'activité est une fonction, légèrement croissante pour les faibles teneurs de 0% à 10%lg et décroissante sur le reste des teneurs de 10% à 50%lg. Il atteint une très faible amélioration de 1.04 pour la teneur de 10%lg et une diminution de 0.74 pour la teneur de 50%lg.

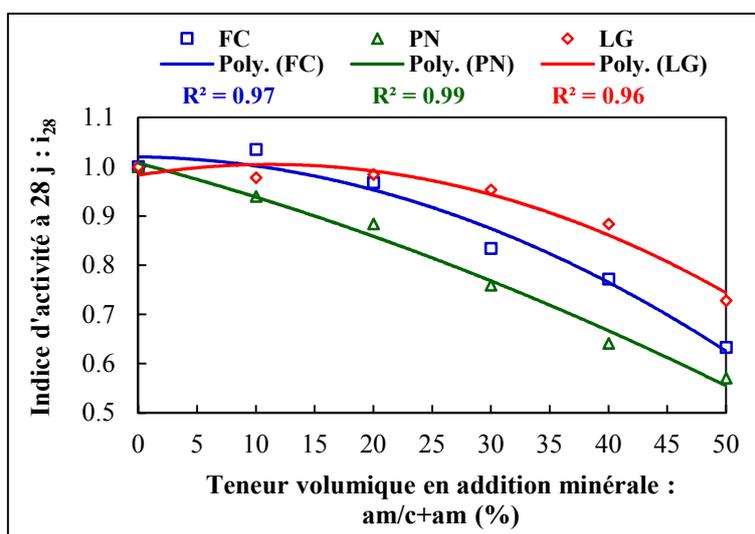


Figure 6.17 : Indice d'activité à 28 j du MAPH en fonction des additions minérales

6.4.3.3 Facteur d'efficacité volumique à 28 jours du MAPH avec additions minérales

La prise en compte de l'incorporation des additions minérale, en substituant le ciment dans le mortier, se fait généralement par la notion du facteur d'efficacité k qui quantifie la quantité d'addition minérale capable de faire l'activité liante au même titre que le ciment. Ce facteur est donné par le rapport ($k = C_{eq}/AM$) qui garantit l'équivalence des performances pour une substitution massique de ciment C_{eq} par l'addition minérale AM . Également, le dosage de l'addition est multiplié par la valeur de k pour estimer le dosage équivalent en ciment C_{eq} , qui est ensuite ajouté au dosage réel existé en ciment C pour donner le liant équivalent L_{eq} ;

$$L_{eq} = C + k AM$$

Ainsi, le rapport initial E/C_0 dans le mortier sans addition est remplacé, en présence d'addition, par le rapport $E/(C + k AM)$.

L'ensemble de la masse de ciment et la masse d'addition donne une masse équivalente de ciment de $C + kAM$. Par conséquent, le volume de ciment équivalent est :

$$\frac{C + kAM}{\rho_C} = c + k \frac{\rho_{AM}}{\rho_C} am$$

où : ρ_C et ρ_{AM} sont respectivement les masses volumiques absolues de ciment et d'addition minérale. c et am sont respectivement les volumes de ciment et d'additions minérale dans le MAPHP.

Comme notre étude est basée sur la substitution volumique du ciment par les additions, le volume de liant équivalent l_{eq} est exprimé, en fonction du facteur d'efficacité volumique k_v , comme suit :

$$l_{eq} = c + k_v am ; k_v = k \frac{\rho_{AM}}{\rho_C}$$

Également dans le MAPHP, les rapports volumiques deviennent ;

$$\frac{e}{c_0} = \frac{e}{c + am} = 1$$

L'effet des additions minérales sur la résistance à la compression peut être analysé donc en déterminant son facteur d'efficacité volumique k_v . En pratique, les valeurs de k_v sont évaluées expérimentalement par dépouillement des indices d'activité des mortiers, à la lumière d'une loi prédictive des résistances. Cette approche est particulièrement utile pour l'estimation de la résistance à la compression pendant la formulation du mortier et béton.

Dans cette étape, nous allons évaluer le facteur d'efficacité à partir des résistances à la compression à 28 jours obtenues précédemment pour le MAPHP avec différents types et teneurs d'additions minérale, et par l'application de deux modèles prédictifs ; loi de Féret et loi de Bolomey.

Application de loi de Féret :

Selon la loi de Féret, la résistance à la compression d'un mortier sans addition est donnée par la relation suivante :

$$R_{c_F}(0) = K_F \left(\frac{c_0}{c_0 + e + v} \right)^2$$

où : c_0 , e et v sont respectivement les volumes de ciment, d'eau et d'air occlus dans le mortier sans additions à l'état frais. K_F est un coefficient constant de Féret dépendant des caractéristiques des granulats et de la résistance normale du ciment.

Pour le MAPHP de référence, le volume d'air n'est pas considéré ($v = 0$) et le rapport $e/c_0 = 1$.

La résistance à la compression de Féret devient ;

$$Rc_F(0) = \frac{K_F}{4}$$

La résistance à la compression d'un mortier avec teneur p en addition est donnée par analogie selon la loi de Féret par la relation suivante :

$$Rc_F(p) = K_F \left(\frac{c + k_v am}{c + k_v am + e + v} \right)^2$$

Sachant que pour le MAPHP de référence, le volume d'air n'est pas considéré, le rapport $e/c_0 = 1$, $c = (1 - p)c_0$ et $am = pc_0$, on obtient ;

$$Rc_F(p) = K_F \left(\frac{k_v p - p + 1}{k_v p - p + 2} \right)^2$$

Puisque le coefficient K_F est constant dans les mêmes conditions de formulation, le facteur d'efficacité volumique k_{vF28} pour le MAPHP à 28 jours peut être évalué par la loi de Féret en fonction de l'indice de l'activité i_{28} ;

$$i_{28} = \frac{Rc_{F28}(p)}{Rc_{F28}(0)} = \frac{4(k_{vF28} p - p + 1)^2}{(k_{vF28} p - p + 2)^2}$$

$$k_{vF28} = \frac{(p - 2)\sqrt{i_{28}} - 2p + 2}{(\sqrt{i_{28}} - 2)p}$$

Application de loi de Bolomey :

Selon la loi de Bolomey, la résistance à la compression d'un mortier sans addition s'écrit par la relation suivante :

$$Rc_B(0) = K_B \left(\frac{C_0}{E + V} - 0.5 \right)$$

où : C_0 et E sont respectivement les masses de ciment et d'eau dans le mortier sans additions. V est le volume d'air occlus exprimé en masse du même volume d'eau. K_B est un coefficient de proportionnalité de Bolomey.

En prenant en compte dans le MAPHHP de référence, la masse volumique de l'eau ρ_E , la masse volumique absolue du ciment $\rho_C = 3100 \text{ kg/m}^3$, le volume d'air occlus est nul ($V = 0$) et le rapport $e/c_0 = 1$, la résistance à compression de Bolomey devient ;

$$R_{c_B}(0) = K_B \left(\frac{\rho_C c_0}{\rho_E e} - 0.5 \right) = 2.6 K_B$$

La résistance à la compression d'un mortier avec teneur p en addition s'écrit par analogie selon la loi de Bolomey comme suit :

$$R_{c_B}(p) = K_B \left(\frac{C + k AM}{E} - 0.5 \right) = K_B \left(\left(\frac{\rho_C}{\rho_E} \right) \left(\frac{c + k_v am}{e} \right) - 0.5 \right)$$

Sachant que pour le MAPHHP de référence, le rapport $e/c_0 = 1$, $c = (1 - p)c_0$, $am = pc_0$ et $\rho_C/\rho_E = 3.1$, on obtient ;

$$R_{c_B}(p) = K_B(3.1 k_v p - 3.1 p + 2.6)$$

Avec la même procédure précédente, le facteur d'efficacité volumique k_{vB28} par la loi de Bolomey pour le MAPHHP à 28 jours est donné comme suit ;

$$i_{28} = \frac{R_{c_B28}(p)}{R_{c_B28}(0)} = \frac{3.1 k_v p - 3.1 p + 2.6}{2.6}$$

$$k_{vB28} = \frac{2.6 i_{28} + 3.1 p - 2.6}{3.1 p}$$

Modèles de facteur d'efficacité volumique :

Les facteurs d'efficacité volumiques calculés à partir des deux relations de résistance, Féret et Bolomey, en fonctions des additions minérales sont illustrés sur la Fig. 6.18. Pour tous les types d'additions et toutes les teneurs des substitutions compris entre 10 et 50 %, les relations de Féret et Bolomey donnent des valeurs très proches et des variations similaires de facteur d'efficacité en fonction de teneur de substitution. Cependant, le modèle de Bolomey donne généralement des valeurs de facteur d'efficacité plus élevées que celles de Féret.

Les facteurs d'efficacité de filler et de pouzzolane sont des fonctions décroissantes de teneur de substitution. Ainsi, le facteur d'efficacité de laitier est une fonction décroissante de la teneur d'incorporation mais au-delà de 20%lg. Cependant, la variation de ce facteur n'est pas similaire pour ces additions. En effet, le facteur d'efficacité est fortement sensible au type d'addition. Le filler possède le facteur d'efficacité le plus important, alors que la pouzzolane possède la valeur la plus faible parmi toutes les additions. Le comportement d'efficacité est meilleur pour le laitier qui devient plus actif en fonction de sa teneur d'incorporation.

L'ajustement des points expérimentaux de l'indice de l'activité permet la détermination des courbes modèles du facteur d'efficacité volumique en fonction de la teneur p en additions minérales, avec une bonne corrélation. Les modèles sont donnés pour chaque additions comme par les lois de Féret et Bolomey ;

$$\begin{aligned} \text{Filler calcaire} & : \begin{cases} \text{Féret} : k_{vF28}(fc) = 0.0008 p^2 - 0.0722 p + 1.9751 \\ \text{Bolomey} : k_{vB28}(fc) = 0.0006 p^2 - 0.0600 p + 1.1840 \end{cases} \\ \text{Pouzzolane naturelle} & : \begin{cases} \text{Féret} : k_{vF28}(pn) = 0.0001 p^2 - 0.0127 p + 0.5581 \\ \text{Bolomey} : k_{vB28}(pn) = 0.0001 p^2 - 0.0123 p + 0.6412 \end{cases} \\ \text{Laitier granulé} & : \begin{cases} \text{Féret} : k_{vF28}(lg) = -0.0006 p^2 + 0.0266 p + 0.5828 \\ \text{Bolomey} : k_{vB28}(lg) = -0.0005 p^2 + 0.0237 p + 0.6372 \end{cases} \end{aligned}$$

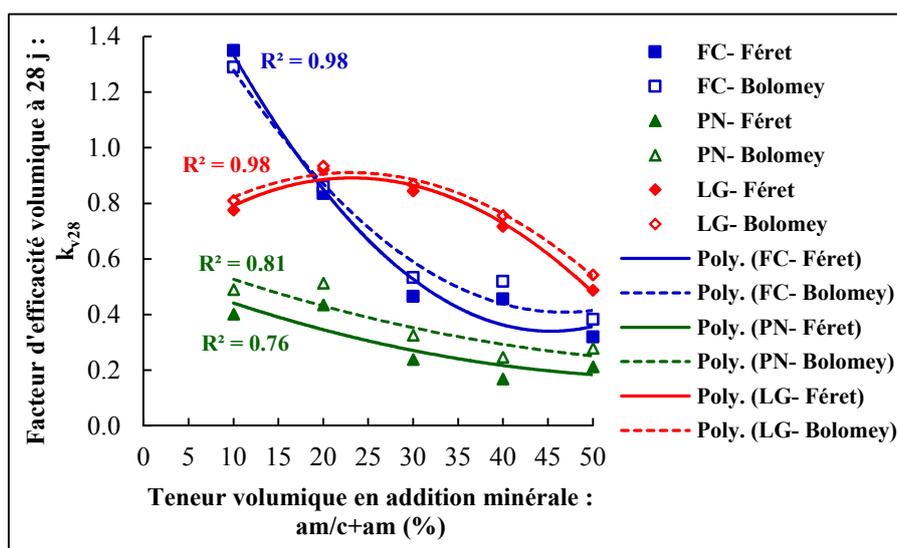


Figure 6.18 : Facteur d'efficacité volumique calculé par les modèles de Féret et Bolomey en fonction des additions minérales

6.5 Optimisation à l'échelle du béton

Tous les types des additions minérales, quasi-inertes comme le filler, pouzzolaniques, comme la pouzzolane et hydrauliques latentes comme le laitier, peuvent être utilisés pour produire le BAPHP. Chaque type des additions minérales exerce des effets différents sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAPHP en fonction de ses caractéristiques et sa teneur dans la formulation [Le & al.].

Dans cette conséquence, l'objectif est de valider l'optimisation du mortier avec additions minérales à l'échelle du béton, dont l'optimisation est réalisée en trois phases. Elle consiste d'abord à développer la formulation du BAPHP de référence à base de ciment comme support de l'optimisation rhéologique et mécanique. Ensuite, les paramètres de la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité) de BAPHP ont été évalués en fonction de l'incorporation de différentes additions minérales. À l'état durci, l'effet de ces additions sur les résistances mécaniques aux différentes échéances a été déterminé.

6.5.1 Développement du BAPHP de référence

Le BAPHP de référence développé dans cette étude est basé sur le MAPHP de référence qui est déjà proposé. Il reste donc à déterminer la teneur en graviers, le volume d'air occlus et le dosage en superplastifiant à utiliser dans cette formulation.

Teneur en graviers :

Pour déterminer la teneur en graviers dans le BAPHP, nous proposons la notion de produit des compacités PC qui est égal au produit de la compacité maximale lâche $c_{l(G)}$ par la compacité maximale serrée $c_{s(G)}$ de l'empilement de graviers constituant de plusieurs classes granulométriques. Le PC est donné comme suit :

$$PC = c_{l(G)} \times c_{s(G)}$$

où les compacités $c_{l(G)}$ et $c_{s(G)}$ sont mesurées expérimentalement par les essais des compacités lâches et serrées des graviers, présentés dans le chapitre 3.

Les chercheurs [Okamura & Ozawa] ont montré que le risque de blocage est empêché lorsque le volume des graviers est limité à la moitié de leur compacité dans la méthode de formulation Japonaise de BAP. Cependant, ils n'ont pas précisé comment mesurer

cette compacité, et même l'estimation par la compacité serrée maximale conduit à un sous dosage en graviers et à un volume important du mortier. C'est pourquoi, nous proposons de formuler le BAPHP avec un volume de graviers légèrement plus grand que celui de la méthode Japonaise.

La fraction volumique des graviers ϕ_G est prise égale au produit des compacités ;

$$\phi_G = PC$$

Dans cette étude, les graviers utilisés ayant deux classes granulaires G3/8 et G8/15 et la combinaison de la moitié de chaque classe (50%G3/8+50%G8/15) donne les deux compacités maximales suivantes ; $c_{l(G)} = 0.549$ $c_{s(G)} = 0.606$. En appliquant ces valeurs, on obtient le produit des compacités et la fraction volumique des graviers dans notre formulation ; $PC = \phi_G = 0.333$. Le volume de gravier dans 1 m³ est donc $g = 333$ litres et qui est dans la fourchette de ($\phi_G = 0.32$ à 0.38) recommandée par [Domone¹] pour la formulation de BAP.

Volume de MAPHP :

La fraction volumique ϕ_{MAPHP} de MAPHP à introduire de le BAPHP est en déduit de 1 moins les fractions volumiques des graviers et de l'air préliminaire qui est estimé forfaitairement de 2%. Elle est donné par la formule suivante ;

$$\phi_{MAPHP} = 1 - \phi_G - \phi_{v_0}$$

Dans notre formulation, le volume de MAPHP est égal 647 litres.

Dosage en superplastifiant :

D'après l'optimisation rhéologique de MAPHP, Le BAPHP est recommandé d'adjuvanté par la dose de saturation en superplastifiant SP* correspondante au liant utilisé. Il est à rappeler que le dosage en superplastifiant est exprimé par pourcentage en son extrait sec par rapport à la masse du liant.

Volume d'air occlus :

Il est en déduit de volume de l'air préliminaire v_0 moins le volume du superplastifiant en extrait sec sp . Il est donné par ;

$$v = v_0 - sp$$

La formulation du BAPHP de référence à base de ciment avec les constituants de l'étude est donnée dans le Tab. 6.11.

Tableau 6.11 : Formulation de BAPHP de référence à base de ciment

Constituants	Volume (l/m³)	Dosage (kg/m³)
graviers 3/8	166.50	432.90
graviers 8/15	166.50	432.90
sable	323.50	821.69
liant - 100% ciment	161.75	501.43
eau	161.75	161.75
dosage en SP*	0.6%	
superplastifiant	2.45	3.01
air préliminaire	20.00	/
air oculus	17.55	/
total	1000.00	2 353.68
Fractions		
graviers/béton	0.33	0.37
granulats/béton	0.66	0.72
mortier/béton	0.65	0.63
pâte/béton	0.32	0.28
Rapports		
eau/liant	1.00	0.32
sable/graviers	0.97	0.95
sable/pâte	1.00	1.24

6.5.2 Formulation du BAPHP avec additions minérales

En se basant sur le BAPHP de référence contenant un liant de 100% ciment, nous avons également confectionné des BAPHP qui se différencient uniquement par la nature de liant binaire constituant de ciment et filler calcaire, pouzzolane naturelle ou laitier granulé. Par la même méthodologie appliquée au MAPHP, l'incorporation des additions minérales dans le liant se fait par substitution volumique progressive de ciment. Les teneurs d'additions considérées varient de 0 à 50%, par unité successive de 10%.

Cette approche volumique de substitution de ciment et incorporation d'addition permet de conserver les mêmes volumes des constituants, et par conséquent le volume total du béton reste constant. Les Tabs. 6.12 & 6.13 & 6.14 regroupent les formulations de différents BAPHP à base des additions minérales, destinées aux optimisations rhéologiques et mécaniques.

Tableau 6.12 : Dosages de BAPHP à base de filler calcaire

BAPHP - FC	fc/c+fc					
	0	10	20	30	40	50
Teneur volumique : (%)						
graviers 3/8 : (kg)	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90
graviers 8/15 : (kg)	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90
sable : (kg)	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69
ciment : (kg)	501.43	451.28	401.14	351.00	300.86	250.71
filler calcaire : (kg)	0.00	40.44	80.88	121.31	161.75	202.19
liant binaire : (kg)	501.43	491.72	482.02	472.31	462.61	452.90
eau : (l)	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75
dosage en SP* : (%)	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
superplastifiant (kg)	3.01	2.95	2.89	2.36	2.31	2.26
air oculus : (l)	17.55	17.60	17.65	18.08	18.12	18.16
masse totale : (kg)	2 353.68	2 343.91	2 334.15	2 323.91	2 314.16	2 304.40
rapport volumique : e/l	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
rapport massique : E/L	0.32	0.33	0.34	0.34	0.35	0.36
rapport volumique : e/c	1.00	1.11	1.25	1.43	1.67	2.00
rapport massique : E/C	0.32	0.36	0.40	0.46	0.54	0.65

Tableau 6.13 : Dosages de BAPHP à base de pouzzolane naturelle

BAPHP - PN	pn/c+pn					
	0	10	20	30	40	50
Teneur volumique : (%)						
graviers 3/8 : (kg)	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90
graviers 8/15 : (kg)	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90
sable : (kg)	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69
ciment : (kg)	501.43	451.28	401.14	351.00	300.86	250.71
pouzzolane naturelle : (kg)	0.00	44.16	88.32	132.47	176.63	220.79
liant binaire : (kg)	501.43	495.44	489.46	483.47	477.49	471.50
eau : (l)	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75
dosage en SP* : (%)	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
superplastifiant : (kg)	3.01	2.97	2.94	2.42	2.39	2.36
superplastifiant (l)	2.45	2.41	2.39	1.97	1.94	1.92
air oculus : (l)	17.55	17.59	17.61	18.03	18.06	18.08
masse totale : (kg)	2 353.68	2 347.65	2 341.64	2 335.13	2 329.12	2 323.10
rapport volumique : e/l	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
rapport massique : E/L	0.32	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34
rapport volumique : e/c	1.00	1.11	1.25	1.43	1.67	2.00
rapport massique : E/C	0.32	0.36	0.40	0.46	0.54	0.65

Tableau 6.14 : Dosages de BAPHP à base de laitier granulé

BAPHP - LG	lg/c+lg						
	Teneur volumique : (%)	0	10	20	30	40	50
graviers 3/8 : (kg)	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90
graviers 8/15 : (kg)	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90	432.90
sable : (kg)	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69	821.69
ciment : (kg)	501.43	451.28	401.14	351.00	300.86	250.71	
laitier granulé : (kg)	0.00	44.97	89.93	134.90	179.87	224.83	
liant binaire : (kg)	501.43	496.25	491.07	485.90	480.73	475.54	
Eau : (l)	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75	161.75
Dosage en SP* : (%)	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50	0.50
superplastifiant : (kg)	3.01	2.98	2.95	2.43	2.40	2.38	
superplastifiant : (l)	2.45	2.42	2.40	1.98	1.95	1.93	
air oculus : (l)	17.55	17.58	17.60	18.02	18.05	18.07	
masse totale	2 353.68	2 348.47	2 343.26	2 337.57	2 332.37	2 327.16	
rapport volumique : e/l	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
rapport massique : E/L	0.32	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34	
rapport volumique : e/c	1.00	1.11	1.25	1.43	1.67	2.00	
rapport massique : E/C	0.32	0.36	0.40	0.46	0.54	0.65	

6.5.3 Effet des additions minérales sur les paramètres de la maniabilité du BAPHP

6.5.3.1 Effet des additions minérales sur la fluidité

Étalement au cône d'Abrams :

L'étalement au cône d'Abrams, pour différents types et teneurs des additions, est représenté sur la Fig. 6.19. Il est possible d'observer l'augmentation de l'étalement avec l'incorporation des taux volumiques en additions minérales dans le liant jusqu'aux proportions optimums par ordre décroissant ; 30% filler, 30% pouzzolane et 20% laitier. Au-delà desquels, une légère diminution de l'étalement a été enregistrée avec l'excès de ces additions. En plus, toutes les teneurs des additions, sauf 50% laitier, gardent le critère de BAP ($SF > 550$ mm), ce qui permet de réduire la quantité du ciment par conséquent abaisser le coût de BAPHP.

Cette amélioration, due à la présence des ajouts minéraux, est habituellement attribuée, d'un côté, à leurs particules les plus fines qui peuvent remplir les vides entre les grains grossiers du ciment et libérer l'eau captive entre eux, et d'un autre côté, à leur morphologie qui présente une faible absorption d'eau et une faible hydratation. La forme de filler ainsi que leur non réactivité lors de l'hydratation tendent à améliorer beaucoup plus la fluidité. En revanche, tout excès des ajouts minéraux, par rapport à la quantité nécessaire pour combler les vides intergranulaires, peut provoquer une perte de la fluidité. Cette perte est plus importante lorsque les teneurs en laitier dépassent 30 %. Les additions agissant par son effet physique, s'insère dans les vides intergranulaires du ciment et libère aisément l'eau captivée dans ces vides, ce qui améliore donc la fluidité.

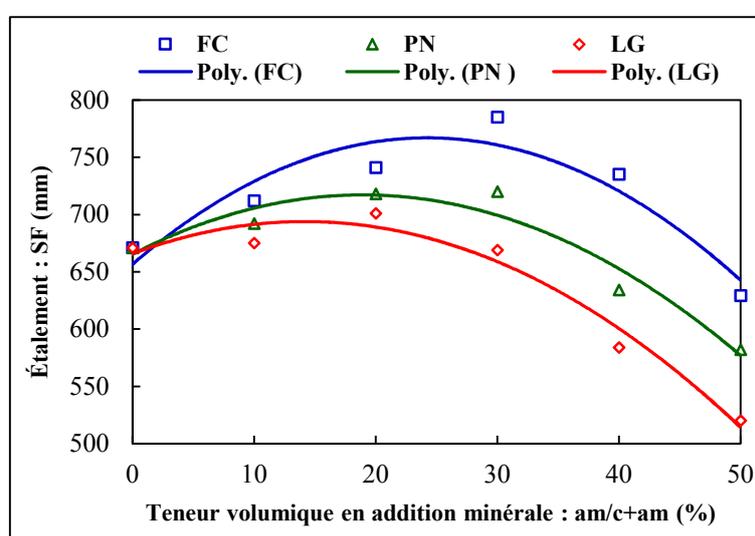


Figure 6.19 : Effet des additions minérales sur la fluidité par l'étalement du BAPHP

Temps d'étalement :

Le temps T_{500} est mesuré lorsque l'étalement $SF = 500$ mm dans chaque essai d'étalement au cône d'Abrams. Il renseigne la vitesse de l'écoulement, et par conséquent la viscosité apparente du béton. La Fig. 6.20 représente le temps d'étalement T_{500} en fonction de différents types et teneurs d'additions. En premier lieu, on remarque que toutes les valeurs obtenues de T_{500} dépassent 2 sec, ce qui indique que les BAPHP formulés à base des additions minérales sont assez visqueux et qui rentrent dans la deuxième classe VS2 de la norme [NF EN 12350-8].

L'incorporation de filler calcaire et de pouzzolane naturelle à des teneurs faibles, de 20%, diminue le temps d'étalement à 2.4 et 2.8 sec respectivement, puis il devient plus lent à

l'ajout de ces additions. Les teneurs faibles en le filler et en pouzzolane réduisent le frottement intergranulaire en favorisant les étalements rapides. Alors que toute augmentation, au-delà de ces teneurs optimales, croît la concentration solide et ralentit donc l'étalement. En plus, le temps d'étalement est une fonction croissante de l'incorporation du laitier qui donne les temps d'étalement les plus lents.

Les BAPHP formulés à base des additions sont donc très fluides et assez visqueux. C'est pourquoi, il n'existe pas une bonne corrélation entre l'étalement SF et le temps T_{500} . Un temps d'étalement rapide n'indique pas une grande fluidité.

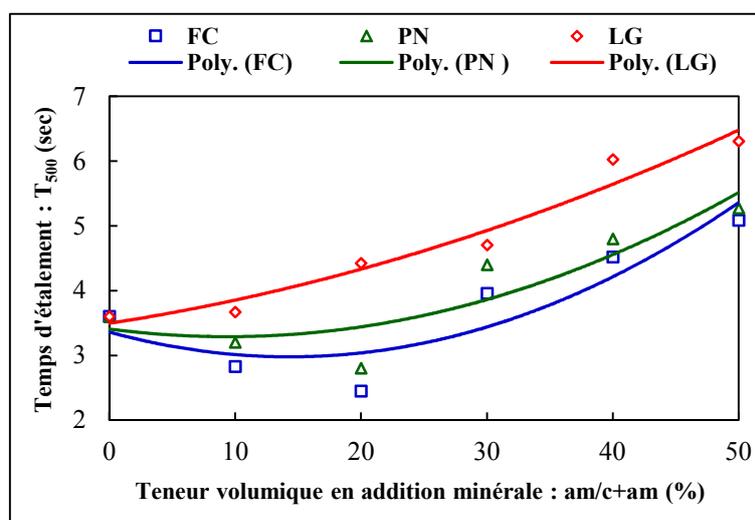


Figure 6.20 : Effet des additions minérales sur la fluidité par le temps d'étalement du BAPHP

Longueur de l'écoulement à la boîte LCPC :

L'essai à la boîte LCPC permet d'évaluer la fluidité de BAPHP au même titre que l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Cependant, les longueurs de l'écoulement mesurées par cette boîte assurent une meilleure corrélation avec les seuils de cisaillement de BAP [Roussel] [Yammine].

La Fig. 6.21 représente la longueur de l'écoulement FL en fonction de différents types et teneurs des additions. Il est possible de remarquer que les courbes de la longueur de l'écoulement sont similaires à celles de l'étalement. Les comportements du BAPHP vis-à-vis de l'essai de la boîte LCPC et l'essai au cône d'Abrams sont presque identiques, et ayant donc les mêmes phénomènes à l'origine des modifications. La Fig. 6.22 confirme la bonne corrélation linéaire entre les deux grandeurs du BAPHP ; l'étalement et la longueur de l'écoulement. Ces résultats sont déjà obtenus pour les BAP par [Yammine] [Ali-Boucetta].

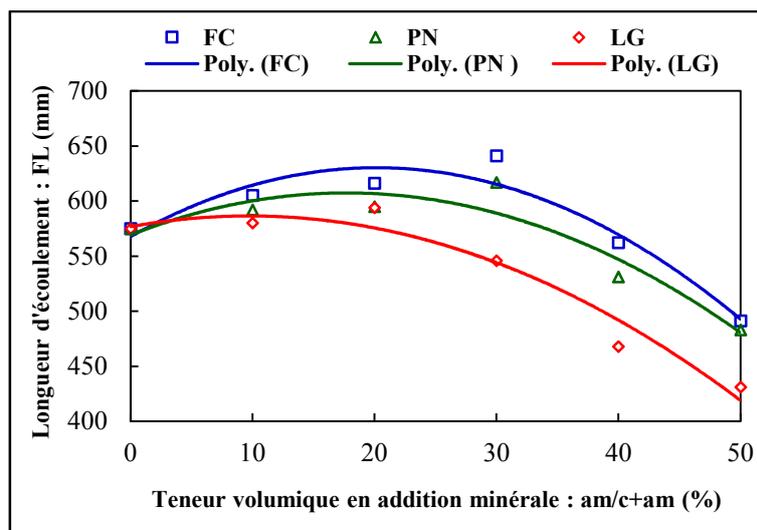


Figure 6.21 : Effet des additions minérales sur la fluidité par la longueur d'écoulement du BAPHP

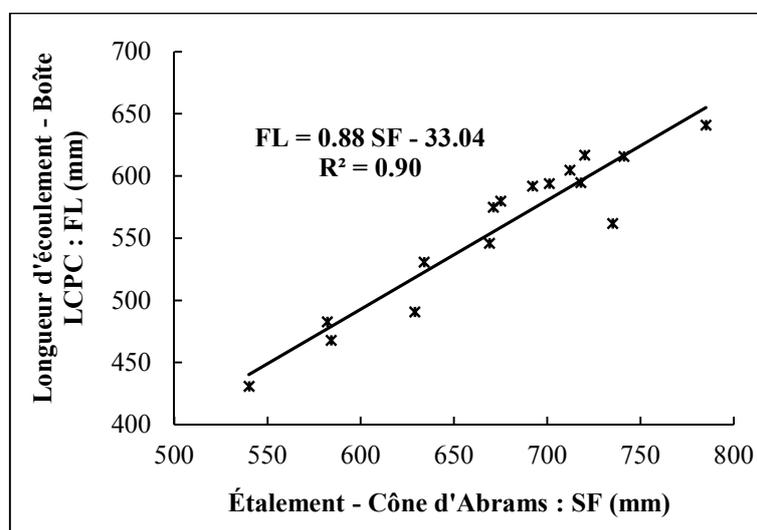


Figure 6.22 : Corrélation de longueur d'écoulement à la boîte LCPC et l'étalement au cône d'Abrams pour les additions minérales dans le BAPHP

6.5.3.2 Effet des additions minérales sur la déformabilité

Le taux de remplissage à la boîte en L, pour différents types et teneurs des additions, est représenté à la Fig. 6.23. On peut remarquer également l'effet positif des additions minérales sur la déformabilité, comme celui de la fluidité. En effet, la substitution d'une quantité du ciment par des teneurs modérées de filler, pouzzolane et laitier tend à améliorer le taux de remplissage. Les proportions optimums, qui offrent les meilleures déformabilités, sont par ordre décroissant 30%fc, 30%pn et 20%lg. Pour ces additions, les courbes de taux de remplissage suivent les mêmes allures de celles de l'étalement.

En analysant les courbes de l'étalement et du taux de remplissage, on remarque que lorsque l'étalement SF dépasse 275 mm, le taux de remplissage PL est parfait de 1. On peut penser donc que le comportement de la déformabilité de BAPHP en fonction des additions est associé directement à la fluidité. En effet, la Fig. 6.24 montre une relation linéaire entre l'étalement et le taux de remplissage du BAPHP avec une droite de corrélation ayant un bon coefficient de détermination.

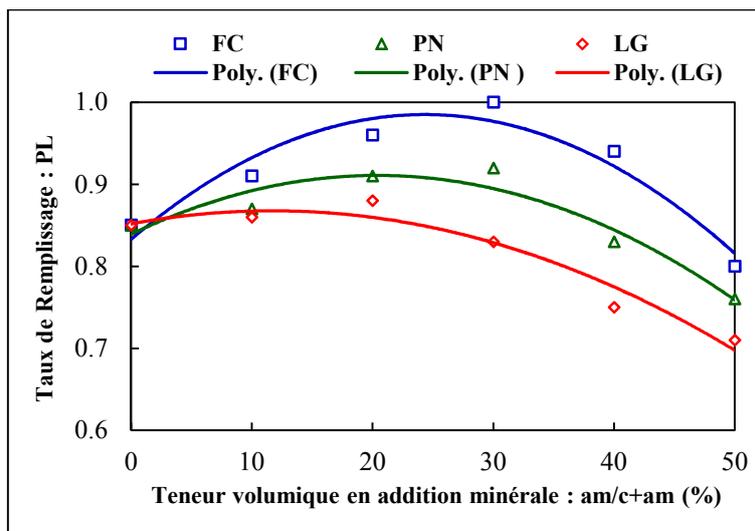


Figure 6.23 : Effet des additions minérales sur la déformabilité par le taux de remplissage de BAPHP

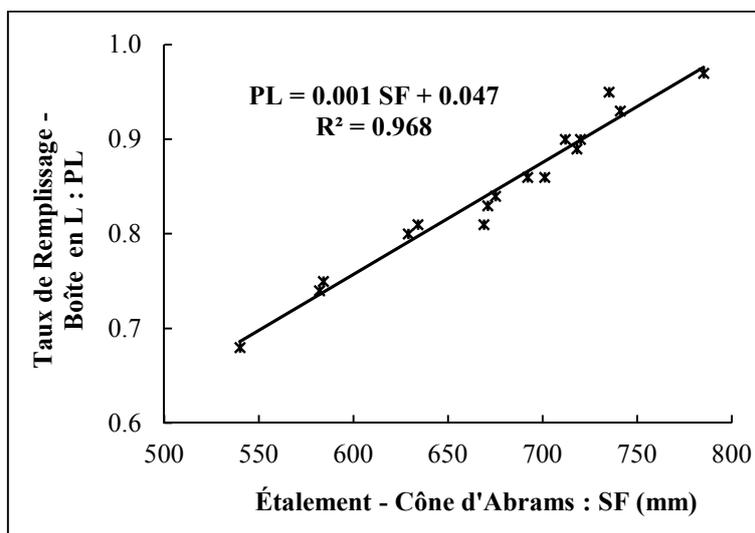


Figure 6.24 : Corrélation de taux de remplissage à la boîte en L et l'étalement au cône d'Abrams pour les additions minérales dans le BAPHP

6.5.3.3 Effet des additions minérales sur la stabilité

L'indice de ségrégation au tamis en fonction de différents types et teneurs des additions est représenté à la Fig. 6.25. On remarque que la stabilité de BAPHP est systématiquement améliorée avec l'introduction des additions. En effet, toutes les incorporations des additions donnent des indices de ségrégation convenables au critère autoplaçant ($SR \leq 20\%$), selon la norme [NF EN 12350-11]. Ce résultat s'explique du fait que les grains des additions améliorent la granulométrie et la compacité du liant et augmentent la viscosité, ce qui peut donner une stabilité accrue [Bessa-Badreddine]. Également, ces grains peuvent augmenter la cohésion du béton, ce qui rend très difficile de dissocier les constituants les uns des autres. Ceci est grâce à leurs grains qui ont la capacité de se fixer très peu aux granulats, et assurent une cohésion très élevée entre la pâte cimentaire et les granulats.

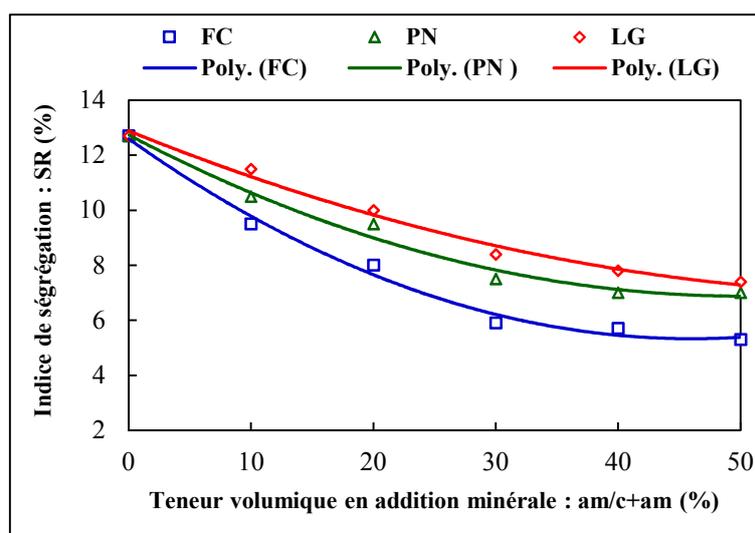


Figure 6.25 : Effet des additions minérales sur la stabilité par l'indice de ségrégation de BAPHP

6.5.4 Effet des additions minérales sur les résistances mécaniques du BAPHP

6.5.4.1 Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 7 jours

La Fig. 6.26 présente l'influence des additions minérales sur la résistance à la compression à 7 jours du BAPHP. En effet, cette résistance à court terme varie différemment en fonction de la nature et la teneur des additions substituant le ciment.

Pour le filler, la résistance à 7 jours est légèrement augmentée pour des faibles proportions jusqu'à 20%fc, puis elle est progressivement diminuée à l'augmentation de teneur de l'incorporation de filler. Le filler offre donc un petit gain de la résistance au jeune âge, qui est maximal à la teneur optimale de 10%fc et qui reste favorable également à 20%fc. Cette action positive de filler est particulièrement due à son effet de remplissage qui améliore la compacité de la matrice cimentaire, et à son effet de surface ou de site de nucléation qui accélère le processus d'hydratation du ciment au jeune âge, mais pour des faibles teneurs de substitution par le filler.

Pour la pouzzolane et le laitier, la résistance à 7 jours est proportionnellement réduite à toute augmentation de taux de substitution du ciment par ces additions. Cette diminution est plus accentuée pour le BAPHP à base de pouzzolane, et notamment pour des fortes teneurs de substitution de ciment de 30% à 50%pn. Cette action défavorable s'explique du fait que l'incorporation de pouzzolane et de laitier est accompagnée par une diminution de la quantité de ciment et, par conséquent, conduit à un rapport e/c plus élevé. Cette diminution de la résistance à 7 jours se traduit également par une réduction de volume d'hydrates formés, puisque les réactions pouzzolaniques et hydrauliques latentes de ces additions ne sont pas suffisantes pour fournir des hydrates au jeune âge. La pouzzolane et le laitier agissent donc comme des additions minérales affectant la résistance à la compression au jeune âge du BAPHP.

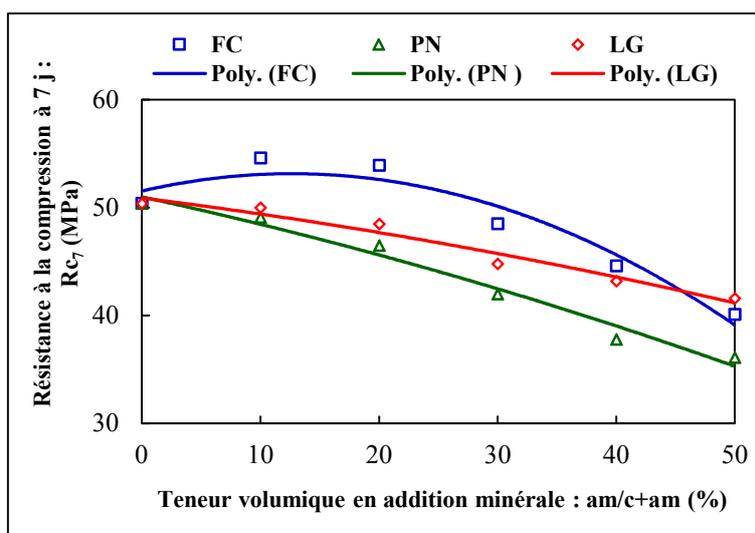


Figure 6.26 : Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 7 j du BAPHP

6.5.4.2 Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 28 jours

La Fig. 6.27 présente l'influence des additions minérales sur la résistance à la compression à 28 jours du BAPHP. Cette résistance à moyen terme varie sensiblement au type et teneur d'additions substituant le ciment, comme la résistance à court terme.

Pour le BAPHP contenant le filler calcaire et le laitier granulé, la résistance à la compression à 28 jours croît légèrement moins forte pour une faible teneur de 10%fc que celle pour 10%lg. Au-delà de cette faible teneur, elle commence de diminuer en fonction de l'augmentation de la teneur de substitution du ciment par ces additions et la diminution de la résistance est plus accentuée pour le filler par rapport au laitier. L'amélioration de la résistance est obtenue même pour la teneur de 20%fc ou 20%lg par rapport à 100%c et elle est plus élevée pour le BAPHP à base de laitier. Le gain minime de la résistance à 28 jours apporté par des faibles teneurs en filler est dû à son effet granulaire favorable et son aptitude à continuer l'accélération de cinétique d'hydratation du ciment à moyen terme. D'autre part, le gain significatif de la résistance à 28 jours apporté par des faibles teneurs en laitier est dû à son activité chimique, en raison de ses propriétés hydrauliques latentes, qui commence à fournir des hydrates au moyen terme.

Pour le BAPHP contenant la pouzzolane naturelle, la résistance à la compression se stabilise pour une faible teneur de 10%pn, puis elle commence d'abaisser fortement aux teneurs progressives de l'incorporation de pouzzolane de 10% à 50%pn. La conservation de la résistance à 28 jours pour une faible teneur en pouzzolane est due principalement à sa propriété pouzzolanique latente qui peut être procédée à moyen terme.

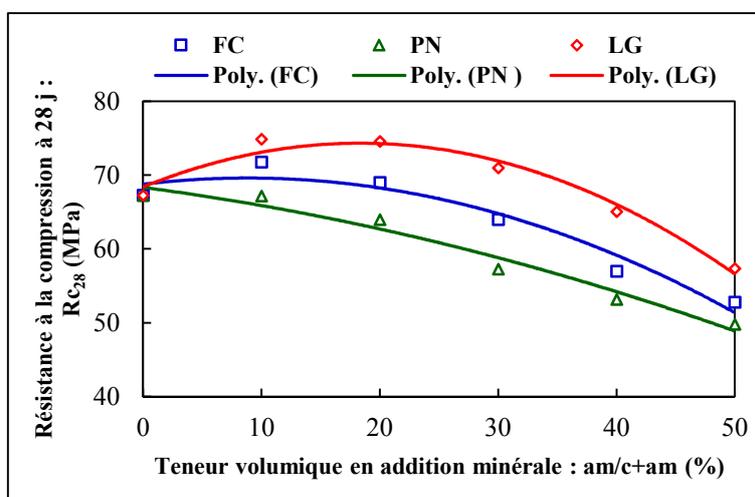


Figure 6.27 : Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 28 j du BAPHP

En outre, la substitution du ciment par des teneurs d'addition, allant jusqu'à 30% filler, 20% pouzzolane et 40% laitier, permet de développer facilement la résistance exigée de BAPHP (≥ 60 MPa).

6.5.4.3 Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 90 jours

La Fig. 6.28 présente l'influence des additions minérales sur la résistance à la compression à 90 jours du BAPHP. Cette résistance à long terme continue à varier différemment en fonction du type et teneur d'additions.

Pour le BAPHP contenant le filler calcaire, la résistance à la compression à 90 jours est une fonction décroissante des teneurs de substitution du ciment de 0% à 50%fc. En effet, le filler maintient cette résistance pour sa seule faible teneur de 10%, puis il provoque une diminution graduelle de la résistance en fonction de ses teneurs progressives de 10 à 50%. Cette diminution s'explique par la disparition de son effet microstructural enregistré à court et à moyen terme et son effet granulaire qui n'est pas capable de maintenir la résistance à la compression à 90 jours. Le filler agit donc comme une addition minérale affectant la résistance à la compression à long terme du BAPHP.

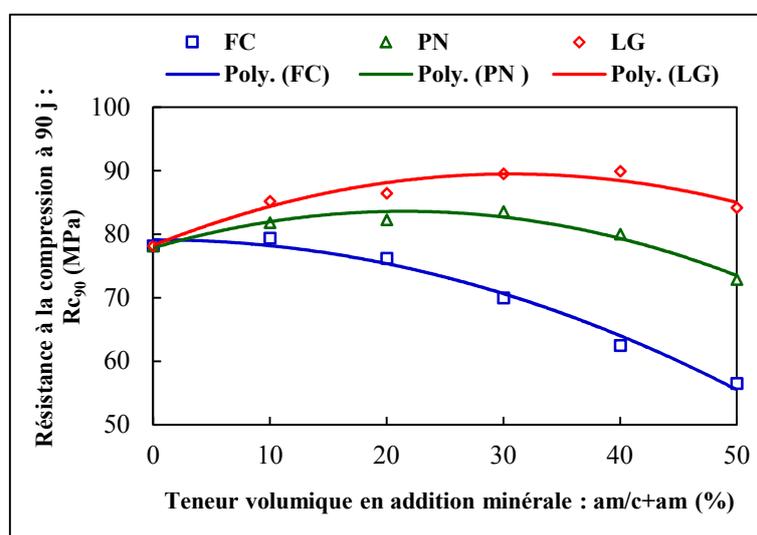


Figure 6.28 : Effet des additions minérales sur la résistance à la compression à 90 j du BAPHP

Pour le BAPHP contenant la pouzzolane naturelle et le laitier granulé, la résistance à la compression à 90 jours est une fonction croissante des teneurs jusqu'à 30%pn et 40%lg, et décroissante sur le reste des teneurs de 30% à 50%pn et 40% à 50%lg. En effet, la pouzzolane augmente légèrement cette résistance jusqu'à une teneur optimale de 30%,

puis elle abaisse la résistance qui reste cependant plus grande que celle de 100%. Par ailleurs, le laitier améliore considérablement la résistance à 90 jours jusqu'à une teneur optimale de 40%, puis il la diminue légèrement pour sa dernière teneur de 50%. Ces additions contribuent généralement à l'hydratation à long terme, chacune par sa propriété chimique. La réaction pouzzolanique de pouzzolane et la réaction hydraulique latente de laitier peuvent être commencées après les 28 jours et améliorées par les conditions de cure en fonction du temps dans le BAPHP.

6.5.4.4 Effet des additions minérales sur la résistance à la traction à 28 jours

La Fig. 6.29 présente l'influence des additions minérales sur la résistance à la traction à 28 jours des BAPHP. Cette résistance varie sensiblement au type et teneur d'additions substituant le ciment, comme la résistance à la compression de même échéance. En effet, les courbes des résistances à la compression et à la traction à 28 jours sont similaires. Le comportement des BAPHP vis-à-vis de ces résistances sont presque identiques, et ayant donc les mêmes origines des modifications.

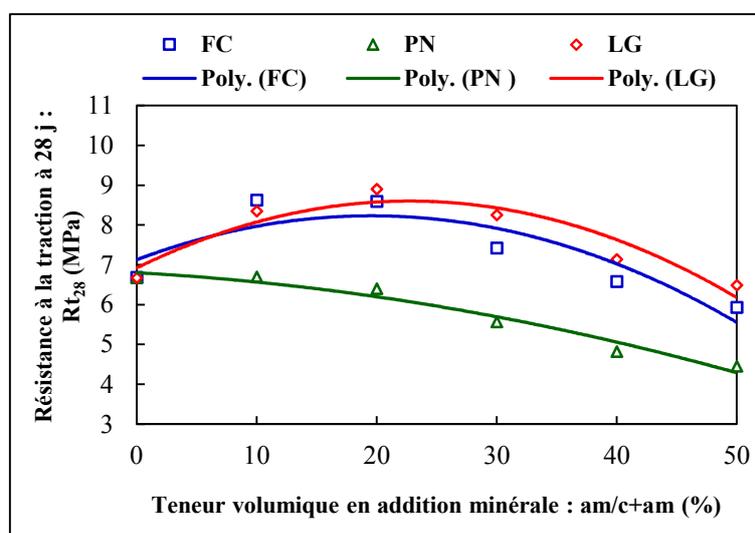


Figure 6.29 : Effet des additions minérales sur la résistance à la traction à 28 j du BAPHP

Pour le filler calcaire et le laitier granulé, la résistance à la traction à 28 jours croît légèrement pour une faible teneur de 20%fc ou 20%lg. Au-delà de ces teneurs optimales, cette résistance décroît en fonction de l'augmentation de la teneur de substitution du ciment par ces additions. Pour ces faibles teneurs, les résistances à la traction des BAPHP avec filler et laitier sont rapprochées contrairement aux résistances à la compression.

L'incorporation de la pouzzolane en remplaçant le ciment entraîne globalement une diminution de la résistance à la traction. La pouzzolane ne peut conserver la résistance de traction du BAPHP de 100% ciment que pour une teneur faible de 10%.

6.5.4.5 Effet des additions minérales sur le rapport de la ductilité à 28 jours

La Fig. 6.30 présente l'influence des additions minérales sur le rapport de la ductilité à 28 jours du BAPHP. Il est exprimé par le ratio entre la résistance à la traction et la résistance à la compression à 28 jours $R_{t_{28}}/R_{c_{28}}$.

Il est possible de remarquer que le rapport de la ductilité est situé pour toutes les additions dans la plage de 0.089 à 0.124, qui est considéré plus important que celle de BHP. Cette tendance s'explique par le fait que le BAPHP est plus homogène et caractérisée par des propriétés mécaniques uniformes. En plus, le BAPHP avec le filler garanti les meilleures valeurs du rapport $R_{t_{28}}/R_{c_{28}}$ par rapport aux autres additions, alors que celui de la pouzzolane donne les valeurs les plus faibles. Le BAPHP contenant le laitier possède le comportement intermédiaire de ductilité.

Pour le filler et le laitier, le rapport de ductilité est une fonction croissante des teneurs jusqu'à 20%fc et 20%lg qui sont des teneurs optimales donnant des rapports de ductilité très élevés de 0.124 et 0.119 respectivement. Au-delà de ces teneurs, le rapport de ductilité diminue de l'augmentation de teneur de ces additions. Par sa nature identique aux graviers et par sa surface rugueuse, le filler augmente l'adhérence de pâte-granulats, et par conséquent augmente le rapport de ductilité de BAPHP. Par sa nature identique aux graviers et par sa surface rugueuse, le filler augmente l'adhérence de pâte-granulats, et par conséquent augmente le rapport de ductilité de BAPHP. Le laitier augmente cette ductilité pas sa forme anguleuse et sa surface rugueuse.

Pour la pouzzolane, la ductilité est une fonction décroissante des teneurs de substitution du ciment de 0% à 50%pn. En effet, l'incorporation de la pouzzolane de 10 à 50% provoque une diminution systématique de rapport de ductilité de 0.100 à 0.089. Ce résultat pourrait s'expliquer par la diminution globale des résistances à la compression et à la traction à moyen terme de BAPHP à base de pouzzolane.

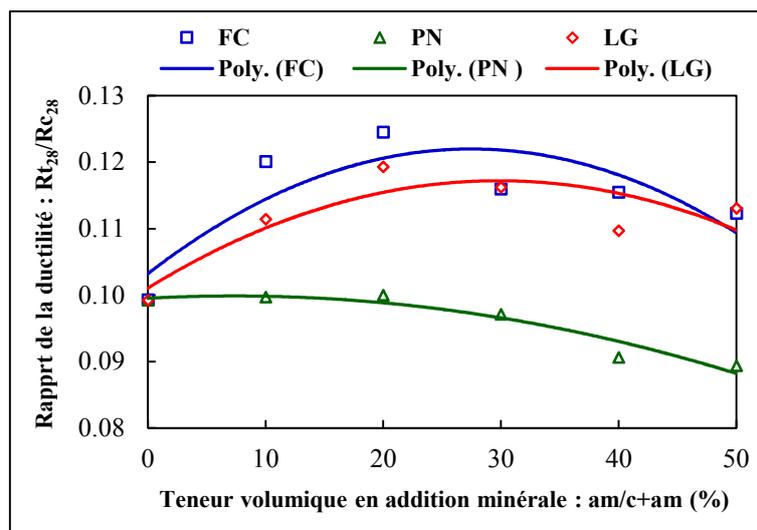


Figure 6.30 : Effet des additions minérales sur le rapport de la ductilité du BAPHP

6.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de développer des BAPHP à base des additions minérales locales, moins coûteuses et répondent à l'aspect environnemental. On a également mis le point sur les effets des additions de filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé sur les propriétés rhéologiques et mécaniques aux plusieurs échelles des matériaux cimentaires à hautes performances (pâte, mortier et béton). On a étudié la fluidité de la pâte, la fluidité et la résistance à la compression du MAPHP, ainsi que les paramètres de la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité) et les résistances mécaniques du BAPHP.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les additions minérales locales utilisées (filler, pouzzolane et laitier) exercent des effets différents, en fonction de leur nature et leur teneur, sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires à hautes performances (pâte, mortier et béton).
- L'approche de la substitution du ciment par les additions minérales volume par volume a été adoptée dans notre étude expérimentale. Elle permet de préserver les mêmes volumes des constituants et par conséquent le volume total reste constant.

- Le mortier autoplaçant à hautes performances MAPHP, ayant des proportions volumiques (2 sable + 1 liant + 1 eau), a été développé comme un bon support au développement de la formulation du BAPHP.
- La demande en eau et en superplastifiant varie sensiblement avec la nature, la forme et la teneur en additions utilisées dans la pâte et le MAPHP. L'incorporation des additions étudiées réduit généralement ces besoins et augmente au même temps l'efficacité de superplastifiants. Le laitier nécessite des quantités plus importantes en eau et en superplastifiant par rapport aux autres additions. Pour remédier au manque de la fluidité, la dose de saturation en superplastifiant SP* est nécessaire à la formulation de MAPHP à base d'additions.
- Le couple optimale proposé de l'étalement au mini-cône et de l'écoulement au mini-entonnoir du MAPHP a pour valeurs ($\Gamma_m = 6.84$; $\text{Log}T_m = 0.78$). Il assure un comportement rhéologique presque identique vis-à-vis du besoin en eau et pousse vers une haute fluidité tout en conservant la stabilité de MAPHP.
- La résistance à la compression, l'indice de l'activité et les facteurs d'efficacité volumiques, évalués par les modèles de Féret et Bolomey, sont très sensibles à la nature et teneur de l'addition incorporée dans le MAPHP à 28 jours.
- Grâce à la notion proposée de produit *PC* des compacités lâches et serrées de graviers, la formulation de BAPHP a été développée.
- L'incorporation de toutes les additions minérales, à des teneurs modérées de 30% filler, 30% pouzzolane, et 20% laitier, améliore beaucoup plus la fluidité et la déformabilité de BAPHP. En effet, la variation de l'étalement, la longueur d'écoulement et le taux de remplissage en fonction de teneur en additions est similaire. Des bonnes corrélations entre ces paramètres sont établies.
- L'utilisation de toutes les additions ayant un effet très bénéfique sur la stabilité de BAPHP, mais avec l'augmentation de la viscosité. En effet, toute augmentation de teneur en additions réduit considérablement l'indice de ségrégation, mais augmente systématiquement le temps de l'étalement. Cette action favorable est très marquée par le filler calcaire.

- Les résistances à la compression à 7, 28 et 90 jours et la résistance à la traction à 28 jours varient sensiblement au type et teneur d'additions substituant le ciment. Les teneurs faibles en additions maintiennent ou améliorent légèrement les résistances, tandis que les teneurs élevée en additions entraînent généralement une diminution de ces résistances.
- L'ajout de filler à teneur 20% donne des résistances à la compression à court et moyen terme (7 et 28 jours) comparables à celle de ciment, mais son efficacité d'augmenter cette résistance à long terme (90%) est disparue. En plus, l'ajout de filler calcaire ayant un effet bénéfique sur les résistances à la traction de BAPHP.
- l'ajout de pouzzolane entraîne une diminution des résistances à court terme et son incorporation à 10% peut stabiliser les résistances à moyen terme, mais son incorporation à 30% donne des résistances à long terme (90 jours) plus hautes que celles de BAPHP à base de ciment. La diminution des résistances est très marquée pour les BAPHP avec pouzzolane à 7 et 28 jours.
- L'ajout de laitier à 10% et à 20% peut stabiliser les résistances à court et moyen terme respectivement, tandis que son ajout à 40% apporte une grande amélioration aux résistances à long terme. L'effet du laitier sur les résistances est très notable surtout à 90 jours.
- L'incorporation des additions minérales à des teneurs volumiques bien déterminées dans le liant peut avoir un effet bénéfique sur les paramètres de la maniabilité et les résistances mécaniques. Les teneurs limites en additions minérales qui assurent tous les critères de BAPHP sont ; 30% de filler, 20% de pouzzolane et 30% laitier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le BAPHP est une nouvelle génération du béton qui s'impose dans le monde de construction. Il doit harmoniser des propriétés contradictoires ; fluidité et déformabilité d'un côté, et stabilité et résistances mécanique de l'autre. Pour satisfaire ces exigences simultanément, sa formule doit comporter un squelette granulaire relativement fin remplissant par une quantité importante de pâte qui contient un peu d'eau et adjuvantée par une forte dose de superplastifiant et parfois une autre dose d'agent de viscosité et/ou fumé de silice. Il n'existe pas à l'heure actuelle d'essai généralisé qui estime simultanément les trois paramètres empiriques de la maniabilité de BAP-BAPHP (fluidité, déformabilité et stabilité). De même, il n'existe pas de méthode de formulation généralisée pour le BAP-BAPHP permettant de choisir précisément les dosages des constituants en fonction de ses 4 propriétés essentielles (fluidité, déformabilité, stabilité et résistance à la compression). Les méthodes disponibles sont toutes semi-empiriques, relativement complexes et peu précises.

Le programme expérimental effectué dans cette étude permet de développer une série de BAPHP à base de sable de carrière, sable de dune, filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé. Il apporte également des réponses claires sur la faisabilité et la valorisation de ces matériaux dans le BAPHP.

À la lumière des principaux résultats obtenus dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le BAPHP à base des combinaisons binaires de différents types de sables de rivière, carrière et dune, a été développé. les combinaisons optimums de (20%SC+80%SR), (40%SD+60%SR) et (60%SC+40%SD) ont un effet positif sur la compacité de l'empilement de sable et également à la compacité du BAPHP à l'état frais. Néanmoins, les compacités maximales obtenues ne donnent ni les meilleures propriétés rhéologiques ni les meilleures résistances mécaniques du BAPHP.
- L'ajout de sable de carrière ou de dune dans le BAPHP diminue fortement sa fluidité et sa déformabilité. Cependant, l'ajout de sable de carrière améliore grandement la

stabilité du BAPHP et l'ajout de sable de dune ayant un effet négligeable sur cette stabilité. Les bétons perdent un seul critère autoplaçant de la déformabilité lorsque le dosage en sable de carrière dépasse 40% et 20% dans les combinaisons (SC/SC+SR) et (SC/SC+SD) respectivement.

- L'ajout de sable de carrière, quel que soit sa teneur, au sable de rivière ou sable de dune augmente considérablement les résistances à la compression à 7 et 28 jours du BAPHP. En effet, toutes les combinaisons de (SC/SC+SR) offrent aux bétons des résistances à hautes performances. Par contre, l'ajout de sable de dune au sable de rivière ou de carrière affecte ces résistances à la compression. Les bétons contenant un faible dosage en sable de dune ($\leq 20\%$) possède également des résistances à hautes performances. Les résistances à la traction à 28 jours sont en excellent accord avec celles à la compression de BAPHP indépendamment des différentes combinaisons de sables.
- Les additions minérales locales utilisées (filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé) exercent des effets différents, en fonction de leur nature et leur teneur, sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des MAPHP et BAPHP.
- Le MAPHP de proportions volumiques (2 sable + 1 ciment + 1 eau) a été développé pour formuler le BAPHP par la notion proposée de produit PC des compacités lâches et serrées de graviers.
- L'incorporation des additions (filler, pouzzolane et laitier) réduit le besoin en eau et augmente l'efficacité de superplastifiants dans la pâte et le MAPHP. La dose de saturation en superplastifiant SP^* est nécessaire pour formuler le BAPHP.
- Le couple optimal proposé de l'étalement relatif au mini-cône et du temps relatif de l'écoulement au mini-entonnoir du MAPHP a pour valeurs ($\Gamma_m = 6.84$; $\text{Log}T_m = 0.78$). Il assure un comportement rhéologique presque identique vis-à-vis du besoin en eau et pousse vers une haute fluidité tout en conservant la stabilité de MAPHP.
- La résistance à la compression, l'indice de l'activité et les facteurs d'efficacité volumiques, évalués par les modèles de Féret et Bolomey, sont très sensibles à la nature et teneur de l'addition minérale incorporée dans le MAPHP à 28 jours.

- L'incorporation d'additions minérales, à des teneurs modérées de 30% filler, 30% pouzzolane, et 20% laitier, améliore beaucoup plus la fluidité et la déformabilité de BAPHP. L'utilisation de ces additions ayant un effet très bénéfique sur la stabilité de BAPHP, mais avec l'augmentation de la viscosité.
- L'incorporation de filler calcaire à une teneur faible de 20% donne des résistances à la compression à court et à moyen terme (7 et 28 jours) comparables à celles de BAPHP à base ciment, mais son efficacité est perdue pour augmenter cette résistance à long terme (90 jours). En plus, l'ajout de filler calcaire ayant un effet bénéfique sur les résistances à la traction et le rapport de la ductilité à 28 jours de BAPHP. À l'opposé, l'ajout de pouzzolane entraîne une diminution des résistances à court terme et son incorporation à 10% peut stabiliser les résistances à moyen terme, mais son incorporation à 30% donne des résistances à long terme (90 jours) plus hautes que celles de BAPHP à base de ciment. La diminution des résistances est très marquée pour le BAPHP avec pouzzolane à 7 et 28 jours. Par ailleurs, l'introduction du laitier à 10% et à 20% peut stabiliser les résistances à court et moyen terme respectivement, tandis que son ajout à 40% apporte une grande amélioration aux résistances à long terme. L'effet du laitier sur les résistances est très notable surtout à 90 jours.
- L'incorporation des additions minérales à des teneurs volumiques bien déterminées dans le liant peut avoir un effet bénéfique sur les paramètres de la maniabilité et les résistances mécaniques. Les teneurs limites en additions minérales qui assurent tous les critères de BAPHP sont ; 30% de filler calcaire, 20% de pouzzolane naturel et 30% laitier granulé.

BIBLIOGRAPHIE

A

[**Achour**]: **Achour T.** *Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens.* Thèse de Doctorat en cotutelle. Université Henri Poincaré, Nancy Université & École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 15 Novembre **2007**.

[**ACI 211.1**]: **American Concrete Institute.** *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.* 91st Edition. p. 33. 1 January **1991**.

[**AFGC**]: **Association Française de Génie Civil.** *Recommandations pour l'emploi des bétons auto-plaçants.* AFGC / PN B@P. Documents scientifiques et techniques. Janvier **2008**.

[**Al-Harthy & al.**]: **Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S.** *The properties of concrete made with fine dune sand.* Construction and Building Materials. V 21, I 8, pp. 1803-1808. August **2007**.

[**Ali-Boucetta**]: **Ali-Boucetta T.** *Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances.* Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar, Annaba. **2014**.

[**Assaad & Khayat**]: **Assaad J.J., Khayat K.H.** *Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete.* Materials and Structures. V 39, I 3, pp. 333-341. April **2006**.

[**Assaad & al.**]: **Assaad J., Khayat K.H., Daczko J.** *Evaluation of static stability of self-consolidating concrete.* ACI Materials Journal. V 101, N 3, pp. 207-215. May-June **2004**.

[**Assié**]: **Assié S.** *Durabilité des bétons autoplaçants.* Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées INSA de Toulouse. 29 Octobre **2004**.

[**ASTM C1610/C1610M-17**]: **American Society for Testing and Materials.** *ASTM C1610/C1610M-17: Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique.* January **2017**.

B

[**Babu & Kumar**]: **Babu K.G., Kumar V.S.R.** *Efficiency of GGBS in concrete.* Cement and Concrete Research. V 30, I 7, pp. 1031-1036. July **2000**.

[**Bartos**]: **Bartos P.J.M.** *An Appraisal of the Orimet Test as a Method for On-site Assessment of Fresh SCC Concrete.* In: Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete. Editors: K. Ozawa K., Ouchi M. Kochi, Japan. pp. 121-135. August **1998**.

[**Bedday**]: **Bedday A.** *Étude du sable calcaire de concassage et son utilisation dans le béton hydraulique.* Thèse de Doctorat. Université de Tunis II. **2000**.

[**Bederina & al.**]: **Bederina M., Makhloufi Z., Bounoua A., Bouziani T., Quéneudec M.** *Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions.* Construction and Building Materials. V 47, pp. 146-158. October **2013**.

- [Belaidi & al.]**: Belaidi A.S.E., Azzouz L., Kadri E., Kenai S. *Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials. V 31, pp. 251-257. June 2012.
- [Belaribi]**: Belaribi O. *Durabilité des bétons autoplacants à base de vase et de pouzzolane*. Thèse de Doctorat. Université Cergy-Pontoise. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem. 2014-2015.
- [Bello]**: Bello L. *Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons autoplacants légers et durables*. Thèse de Doctorat. Université Montpellier 2. 29 Septembre 2014.
- [Benabed & al.]**: Benabed B., Kadri E., Azzouz L., Kenai S. *Properties of self-compacting mortar made with various types of sand*. Cement and Concrete Composites. V 34, I 10, pp. 1167-1173. November 2012.
- [Bessa-Badreddine]**: Bessa-Badreddine A. *Étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers*. Thèse de Doctorat. Université de Cergy-Pontoise. 25 Juin 2004.
- [Bethmont]**: Bethmont S. *Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplacants (BAP) - Étude expérimentale des interactions granulaires*. Thèse de Doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées. 15 Décembre 2005.
- [Billberg]**: Billberg P. *Fine mortar rheology in mix design of SCC*. In: Proceedings PRO 7 of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Skarendahl Å., Petersson Ö. RILEM Publications SARL. Stockholm, Sweden. pp. 47-58. 13-14 September 1999.
- [Bosiljkov]**: Bosiljkov V.B. *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. Cement and Concrete Research. V 33, I 9, pp. 1279-1286, September 2003.
- [Boudchicha]**: Boudchicha A. *Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons*. Thèse de Doctorat. Université Mentouri Constantine. 17 Décembre 2007.
- [Boukhatem & al.]**: Boukhatem B., Ghrici M., Kenai S., Tagnit-Hamou A. *Prediction of Efficiency Factor of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag of Concrete Using Artificial Neural Network*. ACI Materials Journal. V 108, N 1, pp. 55-63. January-February 2011.
- [Bouziani]**: Bouziani T. *Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach*. Construction and Building Materials. V 49, pp. 308-314. December 2013.
- [Bouziani & al.]**: Bouziani T., Bédérina M., Makhloufi Z., Hadjoudja M. *Mixture design approach to evaluate fresh properties of SCC made with various sands*. Journal of Building Materials and Structures. V 1, N 1, pp. 1-9. 2014.
- [Brouwers & Radix]**: Brouwers H.J.H., Radix H.J. *Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study*. Cement and Concrete Research. V 35, N 11, pp. 2116-2136. November 2005.
- [Bui Van & Montgomery]**: Bui Van K., Montgomery D. *Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume*. In: Proceedings PRO 7 of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Skarendahl Å., Petersson Ö. RILEM Publications SARL. Stockholm, Sweden. pp. 373-384. 13-14 September 1999.

[**Bui Van & al.**]: **Bui Van K., Montgomery D., Hinczak I., Turner K.** *Rapid test method for segregation resistance of self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research. V 32, pp. 1489-1496. September **2002**.

C

[**Caré & al.**]: **Caré S., Linder R., Baroghel-Bouny V., de Larrard F., Charonnat Y.** *Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons - Plan d'expérience et analyse statique*. Ouvrages d'Art OA 33. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Février **2000**.

[**Chowdhury & Basu**]: **Chowdhury S., Basu P.C.** *New Methodology to Proportion Self-Consolidating Concrete with High-Volume Fly Ash*. ACI Materials Journal. V 107, I 3, pp. 222-230. 1 May **2010**.

[**Cyr & al.**]: **Cyr M., Lawrence P., Ringot E.** *Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*. Cement and Concrete Research. V 36, I 2, pp. 264-277. February **2006**.

D

[**Desnerck & al.**]: **Desnerck P., Boel V., Craeye B., Van Itterbeeck P.** *Chapter 2: Mechanical Properties*. In: RILEM State-of-the-Art Reports: Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. Editors: Khayat K.H., De Schutter G. Technical Committee 228-MPS. pp. 15-72. Publication **2014**.

[**de Larrard**]: **de Larrard F.** *Structure granulaire et formulation des bétons*. Traduit de l'anglais par Lecomte A. *Concrete mixture-proportioning - A Scientific Approach*. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées LCPC. N OA 34. **2000**.

[**de Larrard & Belloc**]: **de Larrard F., Belloc A.** *L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N 219, Réf. 4246, pp. 41-52. Janvier-Février **1999**.

[**de Larrard & al.**¹]: **de Larrard F., Ferraris C.F., Sedran T.** *Fresh concrete: a herschel-bulkley material*. Materials and Structures. V 31, pp. 494-498. August-September **1998**.

[**de Larrard & al.**²]: **de Larrard F., Bosc F., Catherine C., Deflorenne F.** *La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N 202, pp. 61-69. Mars-Avril **1996**.

[**de Larrard & al.**³]: **de Larrard F., Hu C., Sedran T., Sitzkar J.C., Joly M., Claux F., Derckx F.** *A New Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete*. ACI Materials Journal. V 94, I 3, pp. 234-243. May **1997**.

[**Diederich**]: **Diederich P.** *Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton*. Thèse de Doctorat. Université Toulouse III, Paul Sabatier. 17 Décembre **2010**.

[**Dinakar & al.**]: **Dinakar P., Sethy K.P., Sahoo Y.C.** *Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag*. Materials and Design. V 43, pp. 161-169. January **2013**.

[**Domone**¹]: **Domone P.** *Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method*. Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. November **2009**.

[**Domone**²]: **Domone P.L.** *A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete*. Cement & Concrete Composites. V 29, I 1, pp. 1-12. January **2007**.

[**Domone & Hsi-Wen**]: Domone P., Hsi-Wen C. *Testing of binders for high performance concrete*. Cement and Concrete Research. V 27, I 8, pp. 1141-1147. August 1997.

E

[**Edamatsu & al.**]: Edamatsu Y., Sugamata T., Ouchi M. *A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests*. In: Proceedings PRO 033 of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Wallevik O., Nielsson I. RILEM Publications SARL. Reykjavik, Iceland. pp. 345-354. 17-20 August 2003.

[**EFNARC**]: The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. *Specifications and guidelines for self-compacting concrete*. February 2002.

[**El Hilali**]: El Hilali A. *Étude Expérimentale de la Rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influence des Fines Calcaires et des fibres végétales*. Thèse de Doctorat. Université de Cergy-Pontoise. 17 Décembre 2009.

[**EPG**]: The European Project Group. *The European guidelines for self-compacting concrete - Specification, production and use*. EPG composing Five European Federations: BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC. May 2005.

[**Esmailkhanian & al.**]: Esmailkhanian B., Feys D., Khayat K.H., Yahia A. *New Test Method to Evaluate Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete*. ACI Materials Journal, V 111, I 3, pp. 299-308. May 2014.

F

[**Farran & al.**]: Farran J., Javelas R., Maso J.C., & al. *Study of the existing transition aureole between the aggregates of a mortar and the mass of paste cement hydrated*. Colloque International : Liaison de contact dans les matériaux composites utilisés en génie civil. Toulouse. V I, pp. 60-76. Novembre 1972.

[**Ferraris & de Larrard**]: Ferraris C.F., de Larrard F. *Testing and modelling of fresh concrete rheology*. National Institute of Standards and Technology. NISTIR 6094. February 1998.

[**Felekoglu**]: Felekoglu B. *A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete*. Construction and Building Materials. V 22, I 4, pp. 646-654. April 2008.

[**Felekoglu & al.**]: Felekoglu B., Yucel Yardimci M., Barandan B. *A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete*. In: Proceedings PRO 33 of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Wallevik O., Nielsson I. RILEM Publications SARL. Reykjavik, Iceland. pp. 446-456. 17-20 August 2003.

[**Funk & Dinger**]: Funk J.E., Dinger D. *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions*. Applied to Ceramic Manufacturing. Kluwer Academic Press. New York. 1994.

G

[**Gao & al.**]: Gao J.M., Qian C.X., Liu H.F., & Li L. *ITZ microstructure of concrete containing GGBS*. Cement and Concrete Research. V 35, I 7, pp. 1299-1304. July 2005.

H

[**Haykawa**]: **Haykawa M.** *Development and Application of Super Workable Concrete*. In: Proceedings of International RILEM Workshop on Special Concretes – Workability and Mixing. Editor Bartos P.J.M. Paisley. pp. 183-190. **1993**.

[**Hawkins & al.**]: **Hawkins P., Tennis P., Detwiler R.** *The Use of Limestone in Portland Cement: A State-of-the-Art Review*. Engineering Bulletin 227. Portland Cement Association. **2003**.

[**Houzé**]: **Houzé C.** *Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse*. Thèse de Doctorat. Université Paris-Est. 5 Décembre **2013**.

[**Hwang & Tsai**]: **Hwang C-L., Tsai C-T.** *The effect of aggregate packing types on engineering properties of self-consolidating concrete*. In: Proceedings PRO 042 of the 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC'2005-China). Editors: Yu Z., Shi C., Khayat K.H., Xie Y. Changsha, Hunan, China. RILEM Publications SARL. pp. 337-345. 26-28 May **2005**.

J

[**Jacobs & Hunkeler**]: **Jacobs F., Hunkeler F.** *Design of self-compacting concrete for durable concrete structure*. In: Proceedings PRO 7 of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Skarendahl Å., Petersson Ö. RILEM Publications SARL. Stockholm, Sweden. pp. 397-407. 13-14 September **1999**.

[**Joudi-Bahri**]: **Joudi-Bahri I.** *Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien*. Thèse de Doctorat en cotutelle. Université de Lorraine, France & École Nationale d'Ingénieurs de Tunis .10 Novembre **2012**.

K

[**Kantro**]: **Kantro D.** *Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste – A Miniature Slump Test*. Cement, Concrete and Aggregates. V 2, I 2, pp. 95-102. January **1980**.

[**Khayat & Manai**]: **Khayat K.H., Manai K.** *Les bétons autonivelants : propriétés, caractérisation et applications*. Comptes rendus du Colloque sur les bétons autonivelants. Université de Sherbrooke, Canada. pp. 1-30. Novembre **1996**.

[**Khayat & al.¹**]: **Khayat K.H., Ghezal A., Hadriche M.S.** *Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete*. Materials and Structures. V 32, I 9, pp. 679-686. November **1999**.

[**Khayat & al.²**]: **Khayat K.H., Sonebi M., Yahia A., Skaggs C.B.** *Statistical Models to Predict Flowability, Washout Resistance, and Strength of Underwater Concrete*. In: In: Proceedings 32 of the RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Concrete. Editors: Bartos P.J.M., Marrs D.L., Cleland D.J. E & FN Spon. Paisley, Scotland. pp. 463-481. 3-5 June **1996**.

[**Kheder & Al Jadiri**]: **Kheder G.F., Al Jadiri R.S.** *New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements*. ACI Materials Journal. V 107, I 5, pp. 490-497. September-October **2010**.

[**Koehler & Fowler**]: **Koehler E.P., Fowler D.W.** *Aggregates in self-consolidating concrete*. Research Report ICAR 108-2F. International Center for Aggregates Research. March **2007**.

[**Kwan & Ling**]: **Kwan A.K.H., Ling S.K.** *Filler technology for improving robustness and reducing cementitious paste volume of SCC*. Construction and Building Materials. V 153, pp. 875-885. 30 October 2017.

L

[**Le & al.**]: **Le H.T., Müller M., Siewert K., Ludwig H-M.** *The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures*. Materials and Design. V 72, pp. 51-62. 5 May 2015.

[**Lecomte & al.**]: **Lecomte A., de Larrard F., Mechling J.M.** *Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 234, pp. 89-105. Septembre 2001.

[**Lédée & al.**]: **Lédée V., de Larrard F., Sedran T., Brochu F.** *Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses - Mode opératoire*. Méthode d'essai N° 61. Document technique. Division technologies du génie civil et environnement. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC. Juillet 2004.

[**Liao & al.**]: **Liao K-Y., Chang P-K., Peng Y-N., Yang C-C.** *A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete*. Cement and Concrete Research. V 34, I 6, pp. 977-989. June 2004.

[**Lowke & al.**]: **Lowke D., Wiegrink K.H., Schiessl P.** *A simple and significant segregation test for SCC*. In: Proceedings PRO 33 of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Wallevik O., Nielsson I. RILEM Publications SARL. Reykjavik, Iceland. pp. 356-366. 17-20 August 2003.

[**Luo & al.**]: **Luo F.J., He L., Pan Z., Duan W.H., Zhao X.L., Collins F.** *Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand*. V 47, pp. 131-137. October 2013.

M

[**Ma & al.**]: **Ma K., Feng J., Long G., Xie Y., Chen X.** *Improved mix design method of self-compacting concrete based on coarse aggregate average diameter and slump flow*. Construction and Building Materials. V 143, pp. 566-573. 15 July 2017.

[**Mouret & al.**]: **Mouret M., Ringot E., Escadeillas G.** *Quels outils pour caractériser la ségrégation statique ? Les bétons auto-plaçants*. Presses des Ponts. pp. 53-74. 2011.

N

[**Neville**]: **Neville A.M.** *Propriétés des bétons – Version française : Properties of concrete*. Traduit par CRIB. Eyrolles. Paris. 13 Septembre 2000.

[**Nécira**]: **Nécira B.** *Étude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants*. Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider, Biskra. 20 Novembre 2006.

[**Nepomuceno & al.**]: **Nepomuceno M.C.S., Pereira-de-Oliveira L.A., Lopes S.M.R.** *Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders*. Construction and Building Materials. V 64, pp. 82-94. 14 August 2014.

[**NF EN 196-1**]: **AFNOR.** *NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances*. Septembre 2016.

[NF EN 206]: AFNOR. NF EN 206 : Béton - Spécification, performances, production et conformité. Novembre 2014.

[NF EN 206/CN]: AFNOR. NF EN 206/CN : Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206. Décembre 2014.

[NF EN 934-2+AI]: AFNOR. NF EN 934-2+AI : Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage. Août 2012.

[NF EN 1008]: AFNOR. NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Juillet 2003.

[NF EN 1097-3]: AFNOR. NF EN 1097-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire. Août 1998.

[NF EN 12350-8]: AFNOR. NF EN 12350-8 : Essai pour béton frais - Partie 8 : béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams. Novembre 2010.

[NF EN 12350-9]: AFNOR. NF EN 12350-9 : Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V. Novembre 2010.

[NF EN 12350-10]: AFNOR. NF EN 12350-10 : Essai pour béton frais - Partie 10 : béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L. Novembre 2010.

[NF EN 12350-11]: AFNOR. NF EN 12350-11 : Essai pour béton frais - Partie 11 : béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis. Novembre 2010.

[NF EN 12350-12]: AFNOR. NF EN 12350-12 : Essai pour béton frais - Partie 12 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'anneau. Novembre 2010.

[NF EN 12390-1]: AFNOR. NF EN 12390-1 : Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules. Novembre 2012.

[NF EN 12390-2]: AFNOR. NF EN 12390-2 : Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance. Avril 2012.

[NF EN 12390-3]: AFNOR. NF EN 12390-3 : Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes. Avril 2012.

[NF EN 12390-4]: AFNOR. NF EN 12390-4 : Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance en compression - Caractéristiques des machines d'essai. Août 2000.

[NF EN 12390-5]: AFNOR. NF EN 12390-5 : Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes. Avril 2012.

[NF EN 12620+AI]: AFNOR. NF EN 12620+AI : Granulats pour béton. Juin 2008.

[NF EN 15167-1]: AFNOR. NF EN 15167-1 : Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité. Septembre 2006.

[NF EN 15167-2]: AFNOR. NF EN 15167-2 : Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 2 : évaluation de la conformité. Septembre 2006.

[**Niknezhad**] : **Niknezhad D.** *Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplaçants avec additions minérales : approche expérimentale et numérique.* Thèse de Doctorat. Université Européenne de Bretagne. INSA Rennes. 11 Décembre **2015**.

O

[**Oh & al.**] : **Oh S.G., Nogushi T., Tomosawa F.** *Toward mix design for rheology of self-compacting concrete.* In: Proceedings PRO 7 of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Skarendahl Å., Petersson Ö. RILEM Publications SARL. Stockholm, Sweden. pp. 361-372. 13-14 September **1999**.

[**Okamura & Ouchi**] : **Okamura H., Ouchi M.** *Self-compacting concrete.* Journal of Advanced Concrete Technology. V 1, N 1, pp. 5-15. April **2003**.

[**Okamura & Ozawa**] : **Okamura H., Ozawa K.** *Mix design for self-compacting concrete.* Concrete library of JSCE, N 25. June **1995**.

[**Okamura & al.**] : **Okamura H., Ozawa K., Ouchi M.** *Self-compacting concrete.* Structural Concrete. V 1, pp. 3-17. March **2000**.

[**Omrane & al.**] : **Omrane M., Said Kenai S., Kadri E., Aït-Mokhtar A.** *Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan.* Journal of Cleaner Production. V 165, pp. 415-430. November **2017**.

[**Ouchi & Edamatsu**] : **Ouchi M., Edamatsu Y.** *A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete.* In: Proceedings PRO 7 of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Skarendahl Å., Petersson Ö. RILEM Publications SARL. Stockholm, Sweden. pp. 121-130. 13-14 September **1999**.

[**Ouchi & al.**] : **Ouchi M., Hibino M., and Okamura H.** *Effect of Superplasticizer on self Compactability of Fresh Concrete.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V 1574, pp. 37-40. January **1997**.

[**Ozawa & al.**] : **Ozawa K., Maekawa K., Okamura H.** *Development of High Performance Concrete.* Journal of the Faculty of Engineering. University of Tokyo. V XLI, pp. 381-439. **1992**.

[**Ozbay & al.**] : **Ozbay E., Oztas A., Baykasoglu A., Ozbebek H.** *Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method.* Construction and Building Materials. V 23, I 2, pp. 694-702. February **2009**.

P

[**Pettersson & al.**] : **Pettersson Ö., Billberg P., Bui Van K.** *A model for Self-Compacting Concrete.* In: Proceedings 32 of the RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Concrete. Editors: Bartos P.J.M., Marrs D.L., Cleland D.J. E & FN Spon. Paisley, Scotland. pp. 483-492. 3-5 June **1996**.

R

[**Rmili**] : **Rmili A.** *Étude de formulation et de comportement des BAP : Incorporation du sable de concassage et du sable du désert.* Thèse de Doctorat. École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 13 Janvier **2010**.

[**Roussel**]: **Roussel N.** *The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC.* Materials and Structures. V 4, pp. 889–896. **2007.**

[**Roussel & Coussot**]: **Roussel N., P. Coussot.** “Fifty-cent rheometer” for yield stress measurements: From slump to spreading flow. Journal of Rheology. V 49, pp.705-718. May **2005.**

S

[**Saak & al.**]: **Saak A.W., Jennings H.M., Shah S.P.** *New methodology for designing self-compacting concrete.* ACI Materials Journal. V 98, I 6, pp. 429-439. **2001.**

[**Sahmaran & al.**]: **Sahmaran M., Christianto H.A., Yaman I.O.** *The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars.* Cement and Concrete Composites. V 28, I 5, pp. 432-440. May **2006.**

[**Sakata & al.**]: **Sakata K., Ayano T., Ogawa A.** *Mixture Proportioning for Highly-Flowable Concrete Incorporating Limestone Powder.* ACI Special Publication. V 153, pp. 249-268. 1 June **1995.**

[**Schwartzentruber & Catherine**]: **Schwartzentruber A., Catherine C.** *La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d’aide à la formulation des bétons adjuvantés.* Materials and Structures. V 33, pp 475-482. October **2000.**

[**Sebaibi & al.**]: **Sebaibi N., Benzerzour M., Sebaibi Y., Abriak N-E.** *Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard.* Construction and Building Materials. V 43, pp. 382-388. June **2013.**

[**Sedran**]: **Sedran T.** *Rhéologie et rhéomètre des bétons : Application aux bétons autonivelants.* Thèse de Doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées. 8 Mars **1999.**

[**Sedran & de Larrard**]: **Sedran T., de Larrard F.** *Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model.* In: Proceedings PRO 7 of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Editors: Skarendahl Å, Petersson Ö. RILEM Publications SARL. Stockholm, Sweden. pp. 321-332. 13-14 September **1999.**

[**Shen & al.**]: **Shen L., Struble L., Lange D.** *Testing static segregation of SCC.* In: Proceedings of Self Compacting-Concrete. ACBM, Chicago, IL. **2005.**

[**Shi C. & al.**¹]: **Shi C., Wu Z., Lv K.X., Linmei Wu L.** *A review on mixture design methods for self-compacting concrete.* Construction and Building Materials. V84, pp. 387-398. 1 June **2015.**

[**Shi & al.**²]: **Shi Y., Tanigawa Y., Mori H., Kurokawa, Y.** *A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste.* Transactions of the Japan Concrete Institute. V 20, N 2, pp.9-14. **1998.**

[**Sonebi**]: **Sonebi M.** *Développement des bétons autonivelants à haute performance pour des travaux de réparation sous l'eau.* Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre **1997.**

[**Su & al.**]: **Su N., Hsu K-C., Chai H-W.** *A simple mix design method for self-compacting concrete.* Cement and Concrete Research. V 31, I 12, pp.1799-1807. **2001.**

T

[**Tangtermsirikul & Bui Van**]: **Tangtermsirikul S., Bui Van K.** *Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete.* In: Proceedings of Regional Symposium on

Infrastructure Development in Civil Engineering. Bangkok, Thailand. SC-4. pp. 58-69. 19-20 December **1995**.

[**Tangtermsirikul & al.**]: **Tangtermsirikul S., Sakamoto J., Shindoh T., Matsuoka Y.H.** *Evaluation of Resistance to Segregation of Super Workable Concrete and Role of a New Type of Viscosity Agent*. Taisei Technical Research Report. V 24, pp. 369-376. December **1991**.

[**Turcry**]: **Turcry Ph.** *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation*. Thèse de Doctorat. École Centrale de Nantes et Université de Nantes. 3 Février **2004**.

[**Toutou**]: **Toutou Z.** *Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées : Évaluation des conditions d'extrudabilité*. Thèse de Doctorat. INSA de Rennes, France. **2002**.

[**Trudel**] : **Trudel A.** *Mise au point d'un essai rapide de mesure de la résistance à la ségrégation du béton frais*. Rapport interne de stage. Université de Sherbrooke, Québec. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Septembre **1995**.

V

[**Vivek & Dhinakaran**]: **Vivek S.S., Dhinakaran G.** *Fresh and hardened properties of binary blend high strength self compacting concrete*. Engineering Science and Technology, an International Journal. V 20, I 3, pp. 1173-1179. June **2017**.

W

[**Wang & al.**]: **Wang X., Wang K., Taylor P., Morcoux G.** *Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method*. Construction and Building Materials. V 70, pp. 439-452. 15 November **2014**.

[**Wu & An**]: **Wu Q., An X.** *Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste*. Construction and Building Materials. V 53, pp. 642-651. 28 February **2014**.

Y

[**Yahia & al.**]: **Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y.** *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*. Cement and Concrete Research. V 35, I 5, pp. 532-539. March **2005**.

[**Yammine**]: **Yammine J.** *Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques*. Thèse de Doctorat. École Normale Supérieure de Cachan, France. 5 Décembre **2007**.

[**Yusuf & Olawumi**]: **Yusuf A.Y., Olawumi B.A.** *Comparative study on strength properties of concrete made with river sand and dune sand as fine aggregate*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). V 12, I 4, Version VII, pp. 71-75. July-August **2015**.

Z

[**Zhang & al.**]: **Zhang G., Song J., Yang J., Liu X.** *Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand*. Building and Environment. V 41, I 11, pp. 1478-1481. November **2006**.

[**Zhu & Gibbs**]: **Zhu W., Gibbs JC.** *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement Concrete Research. V 35, I 8, pp. 1457-1462. August **2005**.