

UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT SCIENCE

Spécialité: Génie civil

EFFET DU CLIMAT CHAUD SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE POUZZOLANE NATURELLE

Par

GUETTAF Youcef

Devant le jury composé de :

Menadi Belkacem	Prof, U, Blida1	Président
Boukendakdji Othmane	Prof, U, Médéa	Examineur
Debieb Farid	Prof, U, Médéa	Examineur
Benchikou Mohamed	MCA, U, Médéa	Examineur
Abdessemed Mouloud	MCA, U, Blida1	Examineur
Kenai Said	Prof, U, Blida1	Rapporteur

Blida, 2020

ملخص

تعتبر خصائص الخرسانة ذاتية التسوية (BAP) في الحالة اللدنة والمتصلبة ذات أهمية قصوى بالنسبة إلى شركات الإنشاء التي تهدف إلى تثبيت مناسب ومتانة جيدة لهذه المواد. تتوفر عدة دراسات على الخرسانة ذاتية الصب في مناخ قياسي غير أنه يوجد عدد قليل من الدراسات في البيئة الحارة والجافة وتأثيرهما عليها، وخاصة في وجود الإضافات المعدنية. إن الهدف من هذا العمل هو دراسة خصائص الخرسانة ذاتية التسوية المحتوية على مادة البوزولان الطبيعي في ظل ظروف درجات الحرارة السائدة في حالة الطقس الحار وفحص عواقب هذه الظروف الحرارية على الخصائص في الحالة الصلبة. تم استبدال الإسمنت بمادة البوزولان الطبيعي بالوزن على مستويين (15% و 25%). وتمت دراسة نوعين من العلاج في هذه الدراسة: علاج رطب في بيئة قياسية ($HR = 100\%$ و $T = 20 \pm 2^\circ C$)؛ علاج آخر في الهواء الطلق في شمال أفريقيا منطقة البليدة خلال فترة الصيف مباشرة بعد العلاج الرطب الأولي المقرب 0 و 1 و 3 و 7 و 14 و 28 يوماً (تتراوح درجة الحرارة من 35 درجة مئوية إلى 40 درجة مئوية) والرطوبة النسبية للمنطقة خلال فترة الاختبار تختلف من (65 إلى 70%). تظهر النتائج التجريبية أهمية العلاج الرطب في المناخات الحارة، خاصة عند استخدام البوزولان. كما أن استبدال كمية من الإسمنت بمادة البوزولان يحسن متانة الخرسانة ذاتية التسوية على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية:

خرسانة ذاتية التسوية، بوزولان طبيعي مناخ ساخن، ريولوجيا، مقاومة الضغط، الديمومة.

RESUME

Les propriétés des BAP à l'état frais et durci sont d'une importance capitale pour les constructeurs qui visent une mise en place convenable et une bonne durabilité de ce matériau. La performance du béton auto-plaçant (BAP) dans un climat standard est relativement bien étudiée. Cependant, l'effet du climat chaud est moins étudié, en particulier en présence d'additions minérales. L'objectif de ce travail est de caractériser un béton auto-plaçant à base de pouzzolane naturelle dans des conditions de températures telles quelles prévalent en situation de temps chaud et de regarder quelles sont les conséquences de ces conditions thermiques sur les propriétés à l'état durci. Le ciment a été substitué par de la pouzzolane naturelle en poids à deux niveaux de substitution (15% et 25%). Deux modes de cure ont été étudiés dans la présente étude : une cure humide dans un environnement standard (HR =100% et $T=20 \pm 2$ °C) ; une deuxième cure à l'air libre sur terrasse dans la zone de Blida pendant la période de l'été, après une cure humide initiale de 0,1, 3, 7,14 et 28jours (T° varie de 35°C à 40°C) et l'humidité relative de la région du nord Afrique à Blida pendant la période d'essai (65 à 70%). Les résultats expérimentaux ont montré l'importance de la cure humide dans les climats chauds, en particulier lorsque la pouzzolane est utilisé. La substitution du ciment par de la pouzzolane améliore la durabilité des BAP à long terme.

Mots clés: Béton auto plaçant, pouzzolane naturelle, climat chaud, rhéologie, résistance à la compression, durabilité.

ABSTRACT

The properties self-compacting concrete at the fresh and hardened state are of high importance to construction companies which usually look for ease of construction and good durability of the material. The performance of self-compacting concrete (SCC) in a standard climate is relatively well studied. However, the effect of hot climate is less investigated, especially in the presence of mineral additives. The objective of this work is to investigate the effect of wet curing on the performance of a natural pozzolan based self-compacting concrete under hot weather conditions. The cement was substituted with pozzolan by weight at two substitution levels (15% and 25%). Two curing methods were applied in this study. A wet cure in a standard environment (HR = 100% and $T = 20 \pm 2$ °C) and a cure under open air on the laboratory terrace in a North African area in Blida during the summer period (T varies from 35 to 40 °C and RH varies from 65 to 70%) after an initial wet cure of 0, 1, 3, 7, 14 and 28 days. The experimental results show the importance of wet curing in hot climates, especially when natural pozzolan is used. Substitution of cement with pozzolan improves the long-term durability of SCC.

Keywords: Self compacting concrete, natural pozzolan, hot climate, rheology compressive strength, durability.

REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude s'adresse en premier lieu à mon directeur de thèse M. Said Kenai, Professeur à l'université de Blida, pour sa grande implication dans l'encadrement de ma thèse. Ses précieuses directives et conseils, son intérêt, sa vaste culture et sa rigueur scientifique ont permis à ce travail d'aboutir. Sa contribution dans cette thèse dépasse le cadre scientifique et s'étend au niveau humain.

Je tiens à remercier aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail :

Prof Menadi Belkacem. Université du Blida

Prof Boukendakdji Othmane. Université du Médéa

Prof Debieb Farid. Université du Médéa

Dr Benchikou Mohamed. Université du Médéa

Dr Abdessemed Mouloud. Université di Blida

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux à l'Université du Blida, et tous ceux avec qui j'ai pu collaborer pendant cette thèse.

De sincères remerciements à Dr. Walid Yahyaoui, pour ses remarques pertinentes et constructives qui m'ont permis de finaliser ce travail de recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi aux enseignants, du département de génie civil avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Un remerciement chaleureux pour l'ingénieur du laboratoire Fartas Abdelkader pour sa disponibilité et son aide pour la réalisation des essais même pendant les vacances.

Mille mercis à ma famille, spécialement à ma mère, mes frères et sœurs, mes enfants et mes amis...

Finalement, je remercie de tout mon cœur ma femme, pour son soutien, son encouragement, sa compréhension et sa patience dans tous les domaines et surtout au cours de cette thèse.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ.....	1
REMERCIEMENTS.....	4
TABLE DES MATIERES.....	5
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX.....	15
LISTE DES ABREVIATIONS.....	16
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	20

CHAPITRE I : LE BETON AUTO-PLAÇANT

1.1	Introduction.....	24
1.2	Définition d'un béton autoplaçant.....	25
1.3	Constituants des Bétons auto-plaçant	25
1.3.1	Un volume de pâte élevé.....	25
1.3.2	L'eau de gâchages.....	25
1.3.3	Granulats.....	26
1.3.4	Les super-plastifiants.....	28
1.3.4.1	Poly-naphtalène (PNS).....	28
1.3.4.2	Poly-carboxylate (PC).....	28
1.3.5	Les agents de viscosité.....	31
1.4	Formulation des BAP.....	32
1.4.1	Méthode d'optimisation du mortier ou méthode « japonaise ».....	33
1.4.2	Optimisation de la Quantité de pate.....	35
1.4.2.1	Méthode suédoise.....	35
1.4.2.2	Méthode chinoise.....	36
1.4.3	Méthode d'optimisation du squelette granulaire.....	38
1.4.4	Approches basées sur la recommandation de l'AFGC.....	39
1.5	Rhéologie des BAP.....	40
1.6	Propriétés des BAP à l'état durci.....	44
1.6.1	Résistances mécaniques.....	44
1.6.2	Module de Déformation Longitudinal.....	46
1.6.3	Retrait et fluage.....	46
1.6.4	Perméabilité à l'eau.....	47
1.6.5	Absorption d'eau.....	47
1.6.6	Perméabilité au Gaz.....	48
1.6.7	Perméabilité aux ions Chlore.....	49
1.7	Conclusion.....	51

CHAPITRE II : LE CIMENT ET LES AJOUTS CIMENTAIRES

2.1	Introduction.....	53
2.2	Le ciment Portland.....	53
2.3	Réaction initiale.....	57
2.3.1	Période d'induction (période dormante).....	57
2.3.2	Période d'accélération	58
2.3.3	Période de ralentissement	58
2.4	Les ajouts minéraux.....	59
2.4.1	Définition.....	59
2.4.2	Réactivité des additions.....	59
2.4.3	Matériau hydraulique.....	59
2.4.4	Matériau pouzzolanique.....	60
2.4.5	Matériau inerte.....	60
2.5	Classification des additions.....	60
2.5.1	Ajouts minéraux actifs.....	60
2.5.1.1	Les fumées de silice.....	61
2.5.1.2	Les cendres volantes.....	65
2.5.1.3	Les laitiers de haut fourneau.....	70
2.5.1.4	Les pouzzolanes naturelles.....	74
2.5.2	Ajouts minéraux inertes.....	79
2.5.2.1	Les fillers calcaires.....	79

CHAPITRE III : EFFET DE CLIMAT CHAUD SUR LA PERFORMANCE DES BETONS

3.1	Introduction.....	88
3.2	Le climat chaud.....	88
3.2.1	Définition.....	88
3.2.2	Facteurs climatiques à prendre en compte.....	89
3.3	Effet du climat chaud sur la rhéologie.....	91
3.4	Effet du climat chaud sur le temps de prise.....	99
3.5	Effet de climat chaud sur l'efficacité du super-plastifiant.....	101
3.6	Effet du climat chaud sur l'hydratation.....	105
3.7	Effet du climat chaud sur la résistance mécanique.....	107
3.8	Effet de la cure humide sur la performance du béton en climat chaud..	109
3.9	Effet de climat chaud sur la diffusion des ions du chlore et la porosité..	110
3.10	Effet de climat chaud sur l'absorption capillaire.....	115
3.11	Effet du climat chaud sur la Perméabilité à l'eau.....	117
3.12	Conclusion.....	118

CHAPITRE IV : MATERIAUX UTILISES ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

4.1	Introduction.....	120
4.2	Caractéristiques des matériaux utilisés	120
4.2.1	Le Ciment.....	120
4.2.2	La Pouzzolane naturelle.....	121
4.2.3	Le sable.....	123
4.2.4	Le gravier.....	124
4.2.5	Eau de gâchage.....	125
4.2.6	Les superplastifiants.....	125
4.3	Formulations adoptées.....	125
4.3.1	Formulation du mortier autoplaçant.....	125
4.3.2	Formulation du béton autoplaçant.....	126
4.4	Essais réalisés sur mortier.....	127
4.4.1	Essai d'étalement au Mini-Cône.....	127
4.4.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	128
4.5	Essais réalisés sur béton autoplaçant.....	129
4.5.1	Essais à l'état frais.....	129
4.5.1.1	Essai d'étalement (Flow test).....	129
4.5.1.2	Essai à la couronne J (J-Ring test)	130
4.5.1.3	Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test).....	132
4.5.1.4	Essai à la boîte en L (L-Box test).....	133
4.5.1.5	Essai de résistance à la ségrégation par tamisage.....	134
4.5.1.6	Essai Rhéomètre.....	135
4.5.2	Essais à l'état durci.....	137
4.5.2.1	Résistance à la compression.....	137
4.5.2.2	Essais non destructifs (Scléromètre et Ultrason).....	137
4.5.2.3	Absorption capillaire.....	138
4.5.2.4	La porosité accessible à l'eau.....	139
4.5.2.5	Perméabilité à l'eau.....	140
4.6	Mode de cure.....	141
4.7	Récapitulatif des essais réalisés.....	143

CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

5.1	Introduction.....	146
5.2	Essais sur mortier.....	146
5.2.1	Optimisation du dosage de super-plastifiant.....	146
5.2.1.1	Effet du superplastifiant sur l'étalement.....	147
5.2.1.2	Effet de superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel).....	147
5.2.2	Effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais	149
5.2.2.1	Etalement au mini-cône pour les mortiers.....	149
5.2.2.2	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V-funnel.....	150
5.3	Essais sur béton auto-plaçant.....	151
5.3.1	Compositions utilisés pour les BAP.....	151

5.3.2	Effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.....	152
a	Etalement et Temps T50 au cône d'Abrams.....	153
b	Etalement à la couronne (J-Ring test).....	154
c	Temps d'écoulement en V (V-Funnel).....	155
d	Rapport H2/H1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box).....	156
e	Résistance à la Ségrégation par Tamisage.....	157
5.4	Effet de la pouzzolane sur la Rhéologie des BAP.....	158
5.4.1	Effet de la pouzzolane sur le seuil de cisaillement.....	158
5.4.2	Effet de la pouzzolane sur la viscosité plastique.....	158
5.5	Effet de climat chaud sur le BAP à base de pouzzolane à l'état durci....	162
5.5.1	La résistance mécanique.....	162
5.5.2	Essais non destructifs.....	170
5.5.3	Porosité ouverte accessible à l'eau.....	176
5.5.4	Absorption capillaire.....	179
5.5.6	Perméabilité a l'eau.....	187
5.6	Conclusion.....	192
	CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS	194
	Référence.....	197
	Annexe A : Exemple de calcul de la composition du mortier.....	213
	Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton.....	215
	Annexe C : Copie d'article.....	220

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1	Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle.....	24
Figure 1.2	Essai d'étalement sur un BAP composé de sable roulé (a)et de sable concassé (b).....	27
Figure 1.3	Action des super plastifiants- Déflocculation des grains de ciment...	28
Figure 1.4	Influence de la quantité de super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	29
Figure 1.5	Différentes structures de super-plastifiants : a) PNS b) PC.....	30
Figure 1.6	Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment.....	30
Figure 1.7	Particules de ciment recouvert de polymères à fort encombrement stérique.....	31
Figure 1.8	Formulation qualitative du BAP.....	32
Figure 1.9	Approche générale de formulation des BAP.....	33
Figure1.1 0	Effet du facteur de compacité (PF) sur l'ouvrabilité du béton.....	37
Figure 1.11	Rapport entre compacité réelle et indice de serrage pour un mélange binaire.....	39
Figure 1.12	Comportements rhéologiques pour différents types de béton	40
Figure 1.13	Rhéomètre two-point-test.....	41
Figure 1.14	Rhéomètres à béton IBB.....	42
Figure 1.15	Rhéomètre BML.....	43
Figure 1.16	Rhéomètre à béton BT Rhéom.....	44

Figure 1.17	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant.....	45
Figure 1.18	Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau, (b) couvert et (c) air.....	46
Figure 1.19	Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés.....	48
Figure 1.20	Perméabilité à l'état sec des formulations de BHP.....	49
Figure 1.21	Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants.....	50
Figure 2.1	Schéma de confection d'un ciment Portland Ordinaire.....	53
Figure 2.2	Dessin représentant les minéraux observables au microscope.....	54
Figure 2.3	Evolution schématique de l'avancement de l'hydratation en pâte du ciment Portland Ordinaire	55
Figure 2.4	CSH (a), Portlandite (b).....	56
Figure 2.5	Séquence schématique des réactions de C3S pure (A) et de C3S+C3A+gypse (B).....	57
Figure 2.6	Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: consommation des phases du clinker.....	58
Figure 2.7	Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: formation des hydrates.....	59
Figure 2.8	les particules de fumée silice.....	62
Figure 2.9	Variation du seuil de cisaillement des mortiers à la fumée de silice pour différents types et dosages en superplastifiants.....	63
Figure 2.10	Effets des taux de remplacement en SF sur propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.....	64
Figure 2.11	Courbes porosimétriques montrant l'influence de l'ajout des fumées de silice sur la dimension des pores en fonction du temps d'hydratation.....	65
Figure 2.12	Les particules des cendres volantes.....	66
Figure 2.13	Diagramme triangulaire SiO ₂ / Al ₂ O ₃ / CaO.....	67
Figure 2.14	Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton.....	68
Figure 2.15	Influence du % de CTGA sur les résistances en compression(MPa) des mélanges après 2, 7, 28, et 90 jours de cure endogène.....	69
Figure 2.16	Variation du seuil de cisaillement des mortiers au laitier pour différents types et dosages en superplastifiants.....	72
Figure 2.17	Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 90Jours des BAP à base de laitier.....	73
Figure 2.18	Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28 et 90 jours des BAP à base de laitier.....	74
Figure 2.19	Variation du seuil de cisaillement des mortiers à la pouzzolane naturelle pour différents types et dosages en superplastifiants.....	77
Figure 2.20	Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps...	79

Figure 2.21	La résistance des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane.....	79
Figure 2.22	Illustration de l'effet filler.....	80
Figure 2.23	Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale.....	81
Figure 2.24	Dosage du calcaire (L) et de clincker (C) dans les fractions de différentes tailles après leur broyage.....	82
Figure 2.25	Variation du seuil de cisaillement des mortiers au calcaire pour différent types et dosages en superplastifiants.....	82
Figure 2.26	Résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction des taux de fillers.....	84
Figure 2.27	Résistance à la flexion 3points des mortiers élaborés en fonction du taux des fillers.....	84
Figure 2.28	Porosité ouverte des bétons en fonction de la résistance pour les BAP 25% et 35% de filler + CEM I.....	85
Figure 2.29	Porosité ouverte des bétons en fonction de la résistance pour les BAP 25% filler+ CEM III.....	85
Figure 3.1	Évaluation du taux d'évaporation de l'humidité d'une surface de béton recouverte d'eau.....	91
Figure 3.2	Effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale.....	92
Figure 3.3	Effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90minutes après le malaxage (Mélange A).....	93
Figure 3.4	Effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes après le malaxage (Mélange B).....	93
Figure 3.5	Variation du seuil de cisaillement du MBE-B dans le temps à différentes températures.....	94
Figure 3.6	Variation du seuil de cisaillement du MBE-I dans le temps à différentes températures.....	94
Figure 3.7	Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures.....	95
Figure 3.8	Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures.....	95
Figure 3.9	Seuil de cisaillement en fonction de la température et du temps.....	96
Figure 3.10	Viscosité plastique en fonction de la température et le temps.....	96
Figure 3.11	Variation du seuil 'écoulement en fonction de la température Pour différentes pâtes de ciments.....	97
Figure 3.12	Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en superplastifiant.....	98
Figure 3.13	Accroissement de la température du béton en fonction de celle des Constituants.....	99
Figure 3.14	Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température.....	99

Figure 3.15	Effet de la température sur le temps, début et fin de prise.....	100
Figure 3.16	Adsorption de PC à différentes températures.....	101
Figure 3.17	Fluidité de pâte et l'adsorption de PC par surface spécifique de grain de ciment à la température de 5, 20 et 30°C.....	102
Figure 3.18	Influence de la température sur la concentration en PC libre dans le BAP.....	102
Figure 3.19	Perte de fluidité (t60-t5) en fonction de la température.....	103
Figure 3.20	Variation du temps d'écoulement à 5 et 60 minutes pour différents dosages de superplastifiant SP et différents rapports E/C (T=20°C)	104
Figure 3.21	Degré d'hydratation en fonction de la température et l'âge du béton.....	106
Figure 3.22	Surface spécifique des hydrates en fonction de la température et l'âge du béton.....	106
Figure 3.23	Evolution des degrés d'hydratation (mesure par analyse d'image)..	106
Figure 3.24	Effet des températures sur la résistance à la compression du béton à différents âges.....	107
Figure 3.25	La résistance en compression des BAP (a: BAP3, b : BAP4, c : BAP5).....	108
Figure 3.26	développement de résistance de béton vibré en fonction de la température.....	109
Figure 3.27	Variation de la résistance en compression du mortier (a) et du béton (b).....	109
Figure 3.28	Evolution de la porosité (mesure par analyse d'image).....	111
Figure 3.29	Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une cure humide après démoulage.....	112
Figure 3.30	Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une chambre climatique après démoulage	112
Figure 3.31	Influence de la température d'exposition sur la pénétration des chlorures dans le béton.....	113
Figure 3.32	Coefficient de diffusion en fonction de la température (cure hum)..	113
Figure 3.33	Coefficient de diffusion en fonction de la température (l'air libre)..	114
Figure 3.34	Pénétration de chlorure dans les pâtes de ciment blanc à 5 et 40 °C.	115
Figure 3.35	Pénétration de chlorure dans les pâtes de ciment blanc avec 20 % fumée de silice à 5 et 40 °C.....	116
Figure 3.36	Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 20% de substitution.....	116
Figure 3.37	Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 40% de substitution.....	116
Figure 3.38	Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 60% de substitution.....	116
Figure 3.39	Coefficient de perméabilité en fonction de la température, pendant 1 h et 48h.....	117
Figure 4.1	Pouzzolane broyée.....	122

Figure 4.2	Broyeur à boulet utilisé.....	122
Figure 4.3	Sable de Baghlia(a), Sable de Boughzoul(b).....	123
Figure 4.4	Graviers 8/15(a), Graviers Sable 3/8(b).....	124
Figure 4.5	Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.....	124
Figure 4.6	Séquence de malaxage du mortier.....	126
Figure 4.7	Séquence de malaxage du béton autoplaçant.....	127
Figure 4.8	Essai d'Étalement pour Mortier.....	128
Figure 4.9	Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.....	128
Figure 4.10	Essai d'étalement (Flow test).....	129
Figure 4.11	Dimensions du J-ring	131
Figure 4.12	Mesure d'étalement en présence du J-Ring.....	132
Figure 4.13	Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.....	132
Figure 4.14	Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).....	133
Figure 4.15	Dispositif de l'essai L-Box.....	134
Figure 4.16	Essai de résistance à la ségrégation.....	135
Figure 4.17	Essai Rhéomètre.....	136
Figure 4.18	Profil de vitesse.....	136
Figure 4.29	Dispositif de l'essai de compression simple.....	137
Figure 4.20	Appareil Scléromètre.....	138
Figure 4.21	Appareil Ultrason.....	138
Figure 4.22	Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.....	139
Figure 4.23	Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.....	140
Figure 4.24	Balance hydrostatique.....	140
Figure 4.25	Essai de perméabilité à l'eau.....	141
Figure 4.26	Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.....	141
Figure 4.27	Les éprouvettes conservées dans l'eau douce et à l'aire libre.....	142
Figure 4.28	Variation de la température et de l'humidité durant la période d'essai.....	142
Figure 4.29	Organigramme des différents essais réalisés sur le béton.....	144
Figure 5.1	Valeurs d'étalement en fonction du dosage de Super-plastifiant.....	147
Figure 5.2	Temps d'écoulement en fonction du dosage de super-plastifiant....	148
Figure 5.3	Effet de la teneur en pouzzolane sur l'étalement des MAP.....	150
Figure 5.4	Effet de la teneur en pouzzolane sur le temps d'écoulement des MAP.....	151
Figure 5.5	Étalement en fonction de la teneur en pouzzolane.....	153
Figure 5.6	Temps d'écoulement T50 en fonction de la teneur en pouzzolane...	153
Figure 5.7	Étalement au cône d'Abrams (J-Ring) des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).....	154
Figure 5.8	Temps d'écoulement T50J des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).....	154
Figure 5.9	Différence de hauteurs Bj au J-Ring des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).....	155
Figure 5.10	Temps V-Funnel en fonction de la teneur en pouzzolane.....	155
Figure 5.11	Rapport H2/H1 en fonction de la teneur en Pouzzolane.....	156

Figure 5.12	Temps d'écoulement T20 et T40 en fonction de la teneur en Pouzzolane.....	157
Figure 5.13	Résistance à la Ségrégation au Tamis en fonction de la teneur en Pouzzolane.....	157
Figure 5.14	Seuil de cisaillement en fonction de la teneur en pouzzolane.....	158
Figure 5.15	Viscosité plastique en fonction de la teneur en pouzzolane.....	159
Figure 5.16	Corrélation entre le seuil de cisaillement, la viscosité plastique et l'étalement.....	161
Figure 5.17	Effet de la durée de cure humide initiale sur la résistance en compression à 28jours.....	164
Figure 5.18	Effet de la durée de cure humide initiale sur la résistance en compression à 90jours.....	165
Figure 5.19	Effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance en compression à 28 jours	166
Figure 5.20	Effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance en compression à 90jours.....	166
Figure 5.21	Effet de la teneur en pouzzolane sur l'évolution de la résistance en compression à 28 et 90 jours	167
Figure 5.22	Gain de résistance des trois BAP entre 28 et 90 jours pour une cure humide initiale de 28 jours.....	167
Figure 5.23	Effets de la durée de cure humide initiale sur l'indice de rebondissement sclérométrique à 90 jours.....	172
Figure 5.24	Effets de la durée de cure humide initiale sur la vitesse des ondes ultrasoniques à 90jours.....	173
Figure 5.25	Effets de la teneur en pouzzolane sur l'indice de rebondissement sclérométrique à 90 jours	174
Figure 5.26	Effets de la teneur en pouzzolane cure sur la vitesse des ondes ultrasoniques à 90jours	174
Figure 5.27	Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement.....	175
Figure 5.28	Effet de la durée de cure humide initiale sur la Porosité accessible à l'eau à 90 jours.....	177
Figure 5.29	Effet de la teneur en pouzzolane sur la Porosité accessible à l'eau à 90 jours.....	178
Figure 5.30	Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau.....	178
Figure 5.31	Effet de la durée de cure humide initiale sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours.....	182
Figure 5.32	Effets de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores à 90 jours.....	183
Figure 5.33	Effets de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours pour une cure humide de 0 jour.....	184
Figure 5.34	Effet de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours pour une cure humide de 7jour.....	184

Figure 5.35	Effet de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours pour une cure humide de 14jour.....	185
Figure 5.36	Effet de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours pour une cure humide de 28jour.....	185
Figure 5.37	Effet de la durée de cure humide initiale sur la profondeur de pénétration d'eau à 90 jours.....	189
Figure 5.38	Effet de la teneur en pouzzolane sur la profondeur de pénétration d'eau à 90 jours.....	190
Figure 5.39	Corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration d'eau.....	190

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau1.1	Influence du diamètre maximal des gravillons sur le comportement du BAP à l'état frais.....	27
Tableau2.1	Composition chimique des clinkers portland.....	54
Tableau2.2	Composition minéralogique des clinkers portland.....	54
Tableau2.3	Composition chimique de la Fumée de silice.....	62
Tableau2.4	Composition chimiques du laitier à haut fourneau.....	71
Tableau2.5	Compositions Chimiques(%) de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes.....	75
Tableau 2.6	Compositions minéralogiques de certaines pouzzolanes volcaniques.....	75
Tableau 3.1	La résistance et les caractéristiques physiques de SLWC.....	117
Tableau 4.1	Composition chimique de ciment.....	121
Tableau 4.3	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	121
Tableau 4.4	Composition chimique des pouzzolanes.....	122
	Indice d'activité et teneur en verre de la pouzzolane naturelle.....	122
Tableau 4.5	Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé.....	122
Tableau 4.6	Caractéristiques physique de gravier.....	123
Tableau 4.7	Classes des BAP et domaine d'utilisation selon.....	124
Tableau 4.8	Classification des BAP selon leur application	130
Tableau 5.1	Différentes compositions obtenues pour 1.81 litres de mortier en fonction du rapport SP/L.....	146
Tableau 5.2	Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.....	147
Tableau 5.3	Valeurs du temps au Vfunnel en fonction de dosage de superplastifiant.....	148
Tableau 5.4	Valeurs d'étalement en fonction de dosage en pouzzolane.....	150
Tableau 5.5	Valeurs du temps au V_{funnel} en fonction de dosage en pouzzolane....	151
Tableau 5.6	Composition des BAP testés en kg/m ³	151
Tableau 5.7	Propriétés des BAP étudiés à l'état frais.....	152
Tableau 5.8	Effet de la durée de cure humide initiale sur la résistance à la compression des différents bétons étudiés.....	162
Tableau 5.9	Vitesses des ondes ultrasoniques et Indices de Rebondissement des	

	différents bétons étudiés.....	171
Tableau 5.10	Valeurs de la porosité accessible à l'eau des BAP à 90 jours.....	176
Tableau 5.11	Valeurs d'absorption capillaire.....	180
Tableau 5.12	Valeurs de la perméabilité d'eau des BAP à 90 jours.....	187

LISTE DES ABREVIATIONS

A_{bs}	Coefficient d'absorption du sable
A_{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
BAN	Béton autonivelant
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
BO	Béton ordinaire
BTHREOM	Rhéomètre pour Béton
BV	Béton Vibré
C	Ciment
CPA CEM I 42.5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C_2S	Le silicate bicalcique
C_3S	Le silicate tricalcique
C_3A	L'aluminate tricalcique
C_4AF	L'aluminoferritetétracalcique
CV	Cendre volante
D_{max}	Diamètre maximal des Granulats
D_{moyen}	Diamètre moyen des granulats
E/C	Eau/Ciment
E/F	Eau/Fines
E/L	Eau/Liant
E/F	Les fines

FS	fumée de silice
e_{\min}	Distance minimale entre grains pour permettre l'écoulement du béton
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
LGHF	Laitier de haut fourneau
LS	Lignosulfonate
M_s	Masse de sable par unité de volume de béton
M_g	Masse de gravillons par unité de volume de béton
M_c	Masse du ciment ou liant de l'éprouvette
m_l	Masse du liant (ciment + pouzzolane)
m_e	Masse d'eau
m_g	Masse des granulats
PZ	Pouzzolane
P	Poudre (Ciment + ajout).
PC	Polycarboxylate
PNS	Polynaphtalènesulfonate
P_{gv_m}	Rapport entre le volume des gros granulats de classe m sur le volume total des granulats
P_{cn}	Rapport entre le volume des gros granulats de classe n sur le volume total des granulats
$q(t)$	Chaleur d'hydratation
R_b	Risque de blocage
R_m	Vitesse relative
S	Affaissement final
SCC	Self-Compacting Concrete
S/M	Sable/Mortier
Sp	Superplastifiant

Sp/L	Superplastifiant/Liant
Sp/P	Superplastifiant/Poudre
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T ₂₀	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec).
T ₄₀	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec).
T ₅₀	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec).
V _{vides}	Volume des vides, (m ³)
Vab _m	Les volumes bloqués des granulats de classe m
Vab _n	Les volumes bloqués des granulats de classe n
$\frac{V_s}{V}$	Proportion volumique de sabler apportée au volume total de granulat

LISTE DES SYMBOLES

Γ_m	Etalement relatif
γ	Gradient de vitesse, (s ⁻¹)
η	Viscosité, (Pa.s)
H _S	Humidité du Sable
H _G	Humidité du Gravier
<i>II</i>	Pourcentage de laitance
ρ_C	Masse volumique du ciment
ρ_E	Masse volumique d'eau
ρ_G	Masse apparente du gravier
ρ_S	Masse volumique du sable
ρ_{Sp}	Masse volumique du superplastifiant
$\rho_{\text{vrac},s}$	Masse volumique en vrac du sable
$\rho_{\text{vrac},g}$	Masse volumique en vrac des gravillons
τ	Contrainte de cisaillement, (Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement, (Pa)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. La technologie du béton ne cesse dès lors de se compliquer. On a ainsi assisté à l'émergence de bétons spéciaux tels que les bétons à haute résistance, les bétons auto-compactant (auto plaçant) et les bétons recyclés. Les bétons autoplaçants (BAP) marquent une nouvelle étape dans la technologie des bétons, leur atout est une mise en œuvre facile qui engendre toute une chaîne d'avantage.

Actuellement en Algérie la pouzzolane naturelle est seulement utilisée comme simple ajout pendant la fabrication du ciment dans quelques cimenteries alors qu'il est possible de faire meilleur usage en le considérant comme étant une addition minérale partiellement substituable au ciment aussi bien que les autres additions connues. L'utilisation de la pouzzolane naturelle disponible en grandes quantités dans la région ouest de l'Algérie n'est qu'à ses débuts. Dans nos cimenteries, notamment celle de Béni-Saf et de Zahana, elle est utilisée en faibles quantités (15% en moyenne) comme ajouts au clinker seulement lors du broyage, alors que, la technologie des bétons autoplaçants est capable de consommer d'énormes quantités de la pouzzolane, qui à son tour pourrait apporter et/ou améliorer des caractéristiques et performances de ce type de bétons. En effet les études faites sont concluantes sur les revalorisations de ce matériau, tant technique qu'économique, et préconisent une meilleure utilisation comme substitution au ciment à différentes proportions. Néanmoins les effets de l'environnement et des agents agressifs sur la performance de ces bétons à base de la pouzzolane sont très peu étudiés, notamment l'effet du climat chaud comme celui de l'Algérie.

Le bétonnage par temps chaud, c'est quand le béton est malaxé, transporté, et mis en place dans une température ambiante élevée, une faible humidité et sous une radiation solaire ou exposé au vent. La qualité du béton peut être négativement influencée par les conditions climatiques quand des précautions ne sont pas prises. Les pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient sont soumis à des environnements chauds et secs, en particulier pendant les périodes d'été. Selon le groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC), l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe, d'ici l'an 2100, va se situer entre 1 et 6 °C. Ces projections correspondent à différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, et à des estimations du réchauffement pour ces

scénarios à partir de différents modèles du climat. Et selon le memegroupe, toute l’Afrique du Nord (Maroc, Algérie et Tunisie) sont désormais un "point chaud" du changement climatique, une augmentation de la température de 2 à 3 ° C est attendue dans la région du Maghreb pour l'année 2050. Sur un siècle, la hausse pourrait atteindre 3 à 5 ° C. Ainsi, dans les années à venir, il fera plus chaud et plus sec en Algérie. La température en Algérie atteint souvent 35° C sur les zones côtières et plus au sud, pouvant atteindre 50°C pendant les mois de mai, juin, juillet et août (les mois les plus chauds de l'année). On note que l’Algérie se classe parmi des dix pays les plus chauds dans le monde avec une température qui dépasse 50°C à Ain Salah. En juillet 2018 à Ouargla, dans le Sahara, l'Algérie a enregistré 51,3°C probablement la température "la plus élevée qui a été enregistrée" indique l'OMM (L'organisation mondiale météorologique). Le comportement des BAP à base de la pouzzolane en climat chaud a fait l’objet de peu d’études et la compréhension des phénomènes qui interviennent lors de mise en oeuvre et mise en place est donc nécessaire afin d’étudier leur comportement à long terme dans des environnements chauds comme celui de l’Algérie.

Ce travail sera présenté sous deux parties :

La première partie de cette thèse est consacrée à l'étude bibliographique. Cette étude est composée de trois chapitres. Dans le premier, nous présentons des généralités sur les bétons autoplaçants ainsi que les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ce type de béton. Dans le deuxième chapitre nous avons abordé les différents types des ajouts minéraux et leurs effets sur les différentes propriétés du BAP à l'état frais et durci. Les recherches publiées concernant l’influence du type d’addition minérale sur les propriétés de durabilité des BAP sont également présentés. Le troisième chapitre évoque l'effet du climat chaud sur les mortiers et les bétons, en particulier sur la durabilité des BAP.

La deuxième partie, composée de deux chapitres. Dans le quatrième chapitre on explicitera les différents matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail tout en présentant leurs caractéristiques et différentes propriétés. Ensuite on citera les différents essais tant pour le mortier que pour le béton autoplaçant, en donnant à chaque fois le principe de base de l’essai et en décrivant le mode opératoire. Les essais réalisés sont l’ouvrabilité du mortier autoplaçant par le V-funnel et l’étalement ; l’ouvrabilité du béton autoplaçant par les essais d’étalement au cône, le V-funnel, le J-ring et le L-box. Des essais au réhomètre pour déterminer les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et

viscosité plastique) ont aussi été réalisés. Les essais à l'état durci sont la résistance en compression par les essais destructifs et non destructifs, l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau et la perméabilité à l'eau. Deux types de cure ont été adoptées (cure standard à 20°C et 100% HR et sur le toit du laboratoire durant l'été), et sans cure plus cinq durées de cure humide initiale (1, 3, 7, 14 et 28 jours). Dans le cinquième chapitre on présente et discute les différents résultats obtenus de cette étude expérimentale. Enfin, nous clôturons cette étude par une conclusion générale qui recouvrera les principaux résultats dégagés et les perspectives envisageables pour le futur.

CHAPITRE I :
LE BÉTON AUTO-PLAÇANT

CHAPITRE I :**LE BETON AUTO-PLAÇANT:REVUE BIBLIOGRAPHIQUE****1.1. Introduction.**

Le concept des bétons autoplaçants est né dans les années 1980 au Japon. Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier. Bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise, en témoigne la diversité des études menées afin d'appréhender le comportement des BAP. Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. L'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferrailés ou à géométrie complexe sans blockage (Figure 1.1).

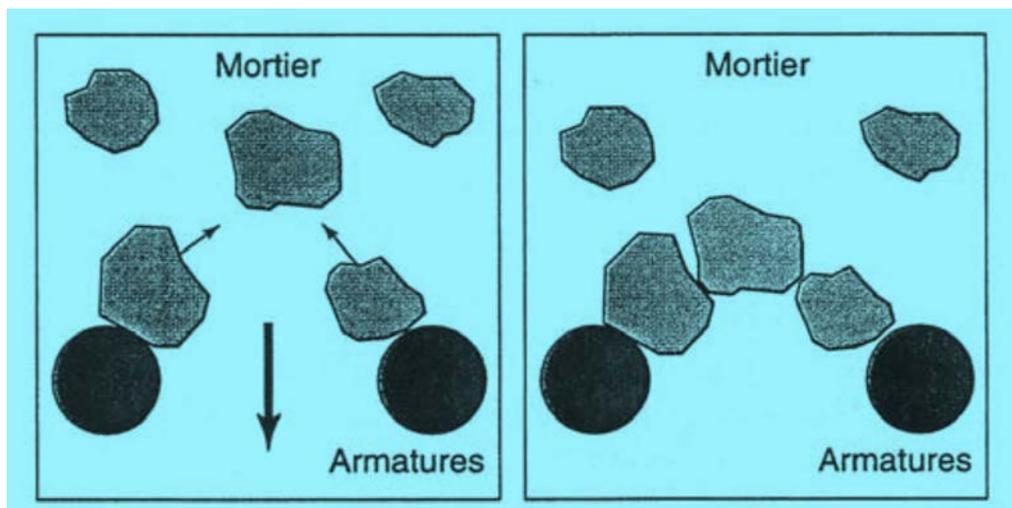


Figure 1.1. Phénomène de blocage d'un granulats au droit d'un obstacle

1.2. Définition d'un béton auto-plaçant

Le béton auto-plaçant se distingue principalement du béton ordinaire par ses propriétés à l'état frais. En effet, le béton auto-plaçant est un béton fluide et parfaitement homogène qui se met en place sans vibration [01]. Il est capable de s'écouler sous son propre poids quel que soit le confinement du milieu et reste homogène. Grâce à son homogénéité, sa résistance à la ségrégation, et sa stabilité ce béton garantit des structures résistantes et durables.

1.3 Constituants des Bétons auto-plaçant

Les compositions tirées de la littérature permettent de souligner deux particularités des BAP: ils comprennent un volume de fines plus important que les bétons classiques et contiennent souvent un agent de viscosité. Ces caractéristiques demeurent intrinsèques au béton auto plaçant et peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

1.3.1 Un volume de pâte élevé

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage, et de ségrégation. Ces ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés à du ciment Portland, influencent les propriétés durci par action hydraulique, pouzzolanique ou les deux. Les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF), la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles en sont des exemples courants. Les propriétés et les caractéristiques des ajouts sont détaillés dans le chapitre II.

Les BAP ont une composition complexe permettant d'obtenir un seuil de cisaillement faible pour maintenir la fluidité et une viscosité plastique élevée pour éviter la ségrégation. L'augmentation du volume de pâte dans les BAP provoque une augmentation linéaire de la fluidité des BAP [02]. En outre, Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le volume important de pâte (ciment + addition + eau efficace + air) limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) permet d'en contrôler la fluidité et la viscosité du matériau

1.3.2 L'eau de gâchages

L'eau de gâchage est un ingrédient essentiel du béton. En effet, introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui

contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc de la résistance mécanique.

L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable et ne doit pas présenter un excès d'impuretés [3], il est exclu d'employer de l'eau de mer qui contient de chlorure de sodium car les sels dissous dans l'eau peuvent intervenir dans la rhéologie du béton, la prise de la pâte de ciment et la durabilité du matériau durci (attaque des aciers d'armatures par les chlorures). La norme NF EN 1008[3], prescrit que l'eau de gâchage doit être propre et que la teneur en matières nocives (acides, sels, matières organiques,...) doit être limitée, afin de ne pas nuire à la prise, au durcissement ou à la durabilité du béton ou causer la corrosion de l'armature.

1.3.3 Granulats

L'optimisation du rapport G/S (Gravillons sur Sable) est un point très important d'une formule de BAP qui caractérise notamment la qualité des granulats utilisés. En effet, un sable qui manque de fines sera complété d'un sable correcteur pour combler ce problème.

Les granulats, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice. Le choix d'un granulats est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudié en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

La granulométrie est primordiale dans une formule de béton auto-plaçant beaucoup plus que pour un béton ordinaire. Le volume de gravillon doit être sous dimensionné afin de garantir l'absence de tout blocage. Certes, le fait que la teneur en gravillon soit calculée à partir de sa compacité permet de prendre en compte sa forme: un gravillon roulé sera plus lisse donc présentera moins de risques de blocage qu'un gravillon concassé; on pourra donc en mettre d'avantage dans le béton, ce qui est traduit par le fait que la compacité d'un gravillon roulé est plus grande (à étendue granulaire identique) que celle d'un granulats concassé

Hamid [4], a effectué des essais de temps d'écoulement au V-Funnel et étalement au cône d'Abrams sur deux formulations du BAP à granulométrie identiques, la première formulation avec un sable roulé la deuxième avec sables concassés il a constaté que le BAP composé de sable roulé a des propriétés d'ouvrabilité plus intéressantes que le BAP

composé de sable concassé. Un facteur de 1,63 sur le diamètre d'étalement (Figure 1.2) et un temps 10 fois plus important pour un essai au V-funnel sont obtenus.



Figure 1.2: Essai d'étalement sur un BAP composé de sable roulé (a) et de sable concassé (b).

Le diamètre maximum des gravillons ne doit pas être trop important ($<20\text{mm}$) pour limiter le risque de blocage entre les armatures. Selon Bouhamou et al. [5], la combinaison (1) ($\Phi_{\text{max}} = 15 \text{ mm}$) a favorisé les meilleures maniabilités et déformabilités par rapport à l'autre combinaison granulaire ($\Phi_{\text{max}} = 20 \text{ mm}$) (Tableau 1.1). Le BAP au $\Phi_{\text{max}} = 20 \text{ mm}$ est dans une limite auto-plaçante basse; il est homogène et ne présente pas de risques de ségrégation statique et de ressuage, mais par contre il a un faible taux de remplissage et un étalement inférieur à 60 cm.

Tableau 1.1 : Influence du diamètre maximal des gravillons sur le comportement du BAP à l'état frais [5]

	$\phi_{\text{max}}=15\text{mm}$	$\phi_{\text{max}}=20\text{mm}$
Étalement (cm)	70,00	58,5
Taux de remplissage H2 /H1	0,87	0,73
Stabilité au tamis π (%)	7,68	10,28
Ressuage (%)	1,15	2,23

1.3.4 Les superplastifiants (NF EN 934-2)

L'apparition des bétons autoplacants et des bétons Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP) [6]. L'action principale des super-plastifiants est de défloculer les grains de ciment (Figure 1.3). Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. L'action dispersante du superplastifiant est liée à une interaction à la fois physique et chimique entre le produit et les particules de ciment [7]. Selon le type de superplastifiant utilisé, les mécanismes d'interactions sont de deux types:

- 1) Une adsorption physique des molécules sur la surface des particules causant une uniformité des charges de surfaces et donc une répulsion électrostatiques des particules.
- 2) Des forces de répulsion d'origine stérique entre les particules. L'effet chimique peut se traduire par la réaction de certaines terminaisons des polymères avec certains sites des grains de ciment.

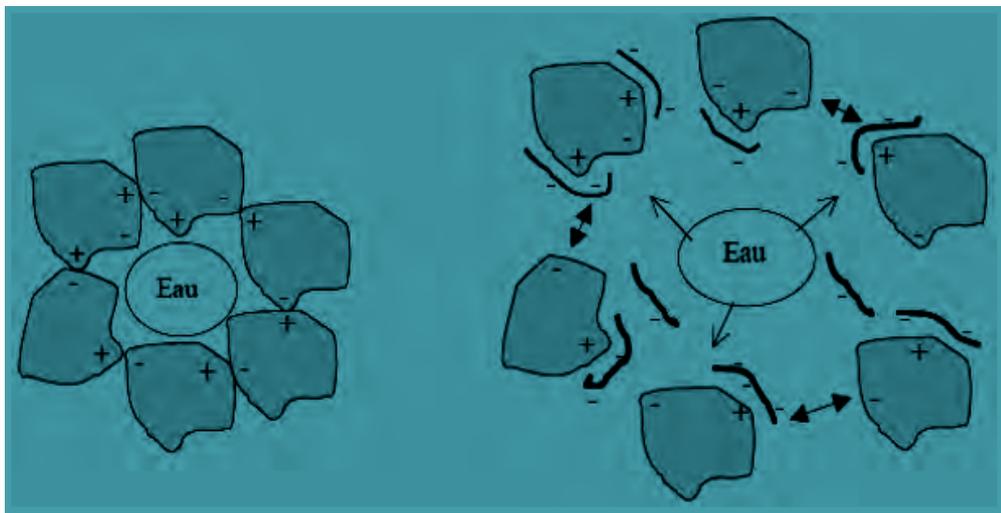


Figure 1.3: Action des super plastifiants- défloculation des grains de ciment [7].

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement. La figure 1.4 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant.

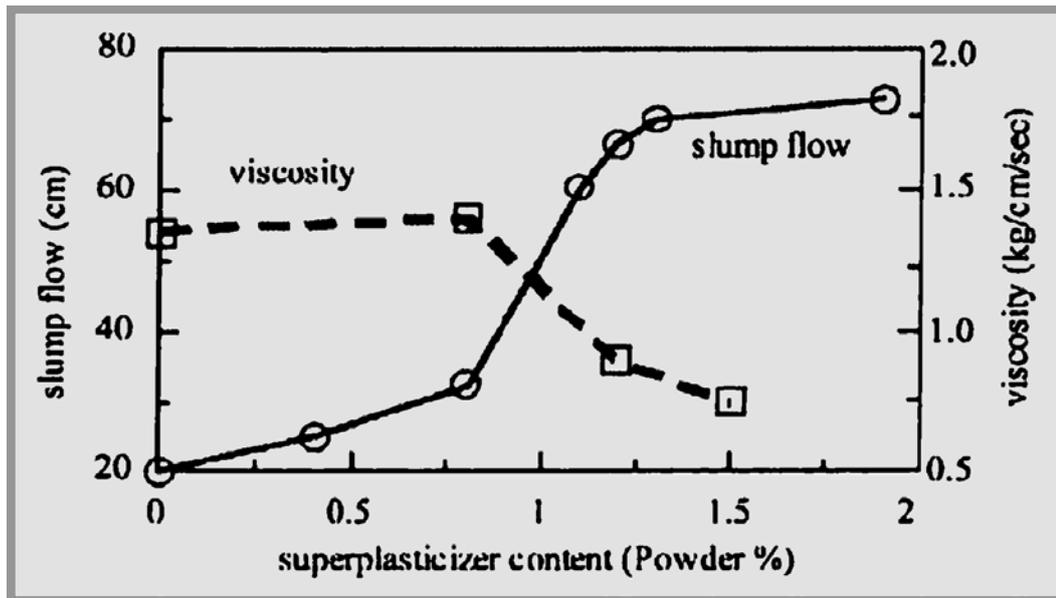


Figure 1.4: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [8].

Actuellement, il existe deux principaux types de superplastifiant sur le marché avec une structure de molécule différente (Figure 1.5) : Le polynaphtalène-sulfonate (PNS) et le polycarboxylate (PC) [9].

1.3.4.1 Polynaphtalène (PNS)

Les molécules de PNS doivent être adsorbées sur les grains de ciment pour développer les forces de répulsion électrostatique. Pour le PNS, les molécules s'adsorbent immédiatement à la surface des grains de ciment après le contact eau-ciment. Les molécules de PNS à structure linéaire induisent un effet fluidifiant principalement par répulsion électrostatique et ont un mode d'action à court et moyen terme (Figure I.5a).

1.3.4.2. Polycarboxylate (PC)

L'adsorption des polycarboxylates (PC) est différente de celle des PNS, car le PC combine les deux caractéristiques structurales: une partie des charges négatives (groupes carboxyliques) sur la chaîne principale et une partie de charge non ioniques (polyéthylène glycol) liée par l'hydrogène avec les particules de silice sur la chaîne secondaire (Figure 1.5b et 1.5a). L'adsorption est déterminée par le groupe carboxylique et la longueur de la chaîne secondaire avec respectivement la répulsion électrostatique et la répulsion stérique.

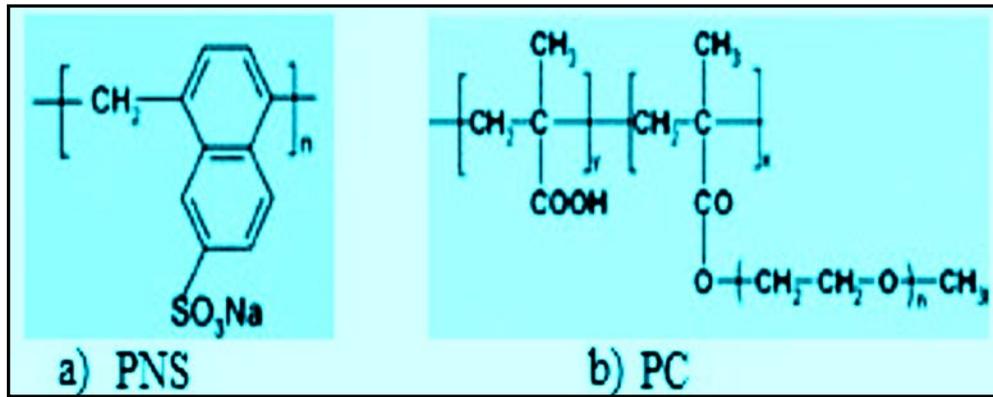


Figure 1.5: Différentes structures de superplastifiants : a) PNS b) PC [9].

Le comportement rhéologique de coulis dépendra des propriétés de ces particules (concentration, dimensions, charges) et des électrolytes qui sont dans la solution [10].

Les phénomènes électrostatiques sont donc prédominants pour le comportement rhéologique d'un coulis. En raison de leurs compositions chimiques différentes, les particules de ciment peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes des autres. Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité du coulis [10]. Par adsorption à l'interface solide-liquide, les plastifiants neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules (Figure 1.6). Par ailleurs, le fait que ces polymères sont adsorbés sur la surface des particules, va créer un encombrement stérique qui va rendre encore plus difficile le contact entre les particules (Figure 1.7).

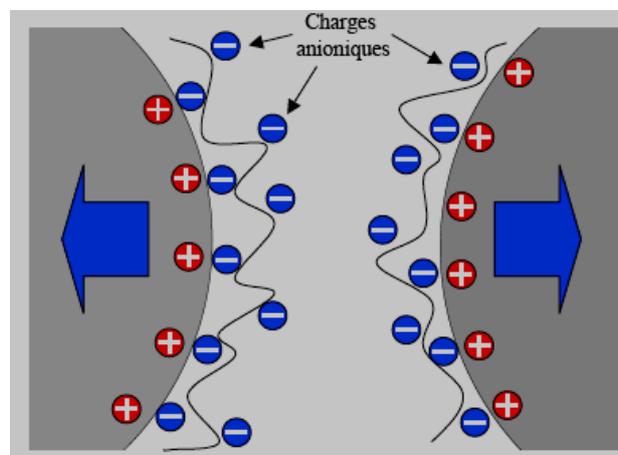


Figure 1.6: Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment [11].

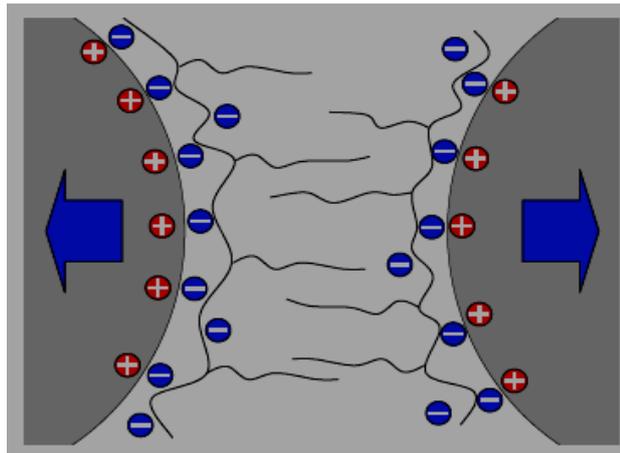


Figure I.7: Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique [11].

1.3.5. Les agents de viscosité

Les BAP contiennent souvent un agent de viscosité qui est pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants. Ces agents se définissent comme étant des produits solubles dans l'eau qui modifient la viscosité du béton en augmentant principalement la viscosité de l'eau. Selon Kawai [12], les agents de viscosité peuvent être classés en trois catégories, à savoir:

- 1) Les polymères naturels incluant l'amidon, la gomme welan et toutes les autres gommés naturelles.
- 2) Les polymères semi synthétiques: comme les amidons décomposés et leurs dérivés et les dérivés de cellulose-éther de type hydroxypropyl méthyl cellulose.
- 3) Les polymères synthétiques tels que les polyacrylamides.

Les agents de viscosité assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage [13].

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air et à une diminution de la fluidité. Petersson et Billberg [14], ont démontré durant leur investigation sur le blocage des bétons

autoplaçants, que l'utilisation d'un agent de viscosité provoque une perte d'ouvrabilité dans les BAP comparés à ceux qui contiennent uniquement des fillers. L'agent de viscosité donne plus de stabilité au BAP mais ne peut en aucun cas remplacer l'ajout minéral.

1.4 Formulation des BAP

En raison d'un nombre de constituants plus élevé que dans un béton ordinaire (BO) et de la fluidité nécessaire tout en conservant l'homogénéité, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons (Figure 1.8). Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [15].

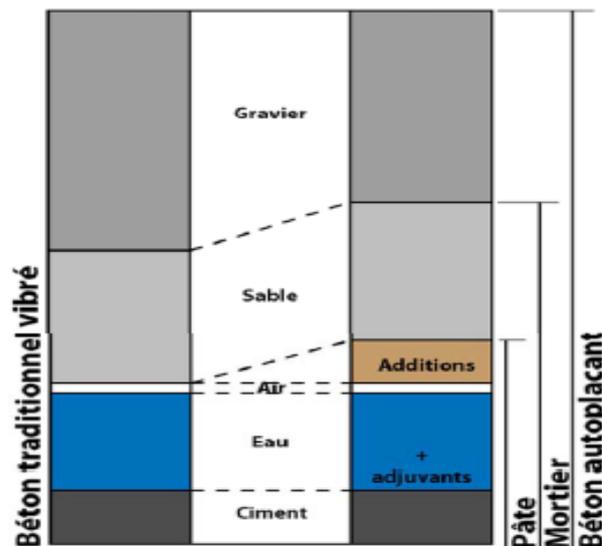


Figure 1.8: Formulation qualitative du BAP (d'après Okamura, 2003) [15].

De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes et essentiellement basées sur les résultats empiriques. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Les premiers travaux réalisés par le professeur Okamura mettent en avant une série de critères facilitant l'obtention des propriétés autoplaçantes (Figure 1.9).

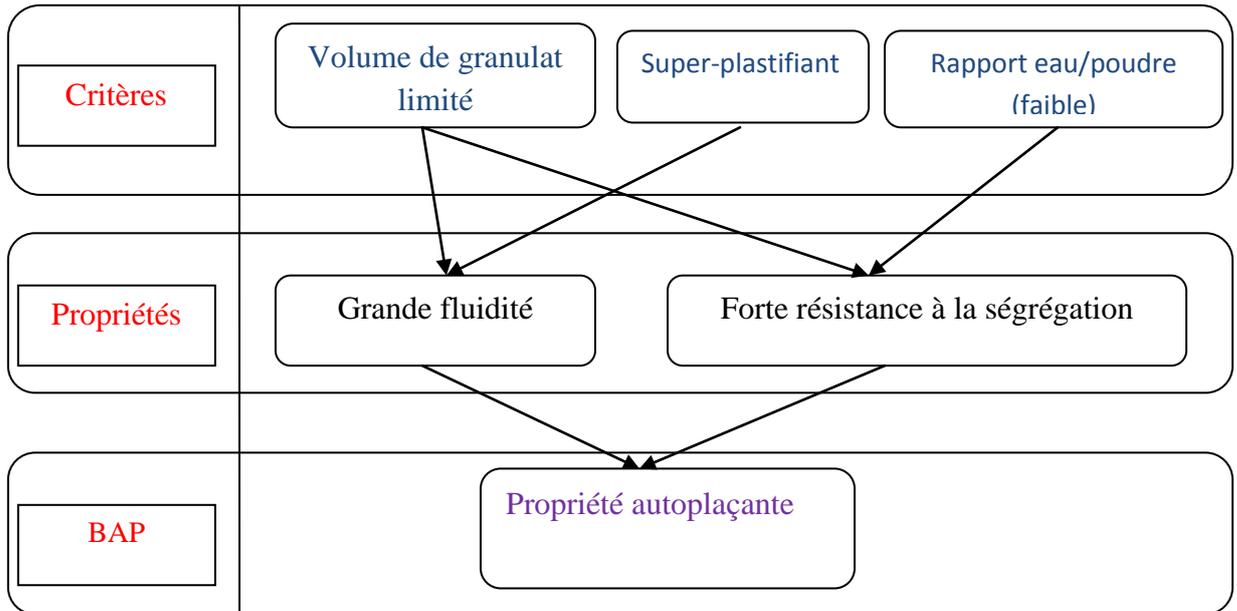


Figure 1.9: Approche generale de formulation des BAP [16].

Parmi les techniques de formulation les plus répandues on cite alors [17]:

- La méthode basée sur l’optimisation des mortiers.
- La méthode basée sur l’optimisation de la pâte.
- La méthode basée sur l’optimisation du squelette granulaire.
- Approche de l’AFGC (Association Française de Génie Civil).

1.4.1 Méthode d’optimisation du mortier ou méthode « japonaise »

Okamura et Ozawa [18], sont les pionniers dans le développement des bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN). Leur méthode de formulation considère le béton comme un composé diphasique constitué de gravillons et de mortier. Elle est basée sur l’approche volumique et vise à augmenter l’étalement et la viscosité apparente du béton en utilisant une grande quantité de fines et une adjuvantation adaptée.

La méthode dite « japonaise » préconise un rapport volumique gravillons/sable autour de 1 pour limiter la quantité des gros granulats et suggère que les gravillons occupent 50 % de la densité volumique compactée du béton. De même, les auteurs fixent la quantité de sable dans le mortier à 40 % de la densité compactée du mortier afin d’assurer une ouvrabilité suffisante au mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de super-plastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l’aide d’essais sur mortiers. Ces

mortiers sont caractérisés conjointement par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir dont découlent deux grandeurs adimensionnelles que sont :

- L'étalement relatif (Γ_m) déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et qui s'exprime par la relation :

$$\Gamma_m = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \dots\dots\dots (1.1)$$

- La vitesse relative d'écoulement (R_m) déterminée par un essai à l'entonnoir en V pour mortier et qui s'exprime par la relation :

$$R_m = \frac{10}{t} \dots\dots\dots (1.2)$$

d : est le diamètre de la galette de mortier, d_0 est le diamètre inférieur du cône (figure 1.11),
 t : est le temps d'écoulement du mortier. Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre Γ_m et R_m pour un dosage en super-plastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, Certains auteurs [6,19], montrent que pour un BAP acceptable $\Gamma_m = 5$ et $R_m=1$

$$\Gamma_m = 5m \dots\dots\dots (1.3)$$

$$R_m = 1s^{-1} \dots\dots\dots (1.4)$$

Cette méthode qui repose sur une approche expérimentale présente l'intérêt d'être simple dans sa mise en oeuvre. Elle permet de formuler des BAP pour une large gamme d'applications, depuis les bétons à faible résistance, tels que les bétons destinés aux ouvrages massifs jusqu'aux bétons à haute performance. Toutefois, la méthode dite « japonaise » conduit à des bétons trop riches en fines et par conséquent plus coûteux d'un point de vue industriel du fait du sous-dosage en gravillons pour garantir l'absence de blocage en présence d'obstacle. Dans un souci d'économie d'autres auteurs ont donc cherché à optimiser la quantité de pâte [20].

1.4.2 Optimisation de la Quantité de pate

1.4.2.1 Méthode suédoise

Plusieurs auteurs ont proposé différentes approches qui reposent sur le confinement des granulats pour réduire le volume de pâte dans le mortier ou dans le béton [21,22]. Cette démarche consiste à définir le volume critique de granulat V_{crit} en dessous du quel le risque de blocage est nul. Tangtermsirikul et Van [22], ont travaillé sur l'évaluation du risque de blocage de béton au cours de l'essai de la boîte en L. Sur la base des résultats, les auteurs définissent le volume critique de granulats V_{crit} dans un béton à partir de la relation suivante :

$$V_{b\min} = 1 - \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) Nga}{\sum \frac{Pvg_m \cdot Nga \cdot \rho_s}{Vab_m} + \sum \frac{Pvs_n \cdot (1 - Nga) \cdot \rho_g}{Vab_n}} \dots\dots\dots (1.5)$$

Avec ρ_g masse volumique du gravillon, ρ_s masse volumique du sable, Nga pourcentage de gros granulats, Pvg_m et Pvg_n rapport entre le volume des gros granulats de classe m et les granulats fin de classe n respectivement) sur le volume total des granulats, Vab_m et Vab_n respectivement les volumes bloqués des granulats de classe m et n.

Ils prennent en compte la distance entre armatures (c) et le diamètre d'une fraction granulaire d_i tel que :

$$Dca = \frac{c}{d_i} M_i = M_{i-1} + \frac{3}{4} (M_i - M_{i-1}) \dots\dots\dots (1.6)$$

M_i et M_{i-1} : sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire i

Par ailleurs, la quantité de pates minimum requise pour obtenir une certaine fluidité est calculée par :

$$V_{pate,mini} = 1 - \frac{1 - V_{vide}}{\left(\frac{e_{min}}{D_{moyen}} + 1\right)^3} \dots\dots\dots (1.7)$$

V_{vide} : Volume de vide du squelette granulaire ;

E_{min} : Distance minimale entre grains pour permettre l'écoulement du béton ;

D_{moyen} : Diamètre moyen des granulats.

Il faut toutefois noter que cette valeur est une valeur par défaut puisque le volume de pâte réel doit être supérieur au volume de pâte indiqué pour écarter les granulats et garantir un étalement suffisant du béton.

1.4.2.2 Méthode chinoise

Su et Miao [23], ont introduit une nouvelle approche d'optimisation du volume de pâte à partir du facteur de compacité qui exprime le rapport de la masse volumique réelle sur la masse volumique en vrac du squelette granulaire dans le béton. Cette approche considère le béton comme un matériau diphasique constitué d'un squelette granulaire (gravillon et sable) dont la porosité est remplie par la pâte. Elle repose sur l'adaptation du niveau de serrage du squelette granulaire dans le béton à partir du facteur de compacité qui s'exprime par la relation :

$$PF = \frac{\rho^d}{\rho^l} \dots \dots \dots (1.8)$$

PF : Facteur de compacité ;

ρ^d : Masse volumique réelle du squelette granulaire dans le béton auto-plaçant ;

ρ^l : Masse volumique en vrac du squelette granulaire dans le béton auto-plaçant.

Selon les auteurs, le facteur de compacité est un paramètre qui permet de contrôler la quantité de pâte et donc l'ouvrabilité. Ce paramètre est toujours supérieur à 1. Une valeur élevée du facteur de compacité conduit à une quantité de granulats (gravillons et sable) plus importante et donc à un volume de pâte plus réduit. Par contre, une valeur faible du facteur de compacité peut conduire à une quantité de pâte plus élevée et engendrer une plus grande ouvrabilité. Comme l'indique la Figure 1.10, l'étalement du béton auto-plaçant augmente de 220 à 700 mm lorsque le facteur de compacité diminue de 1,22 à 1,14.

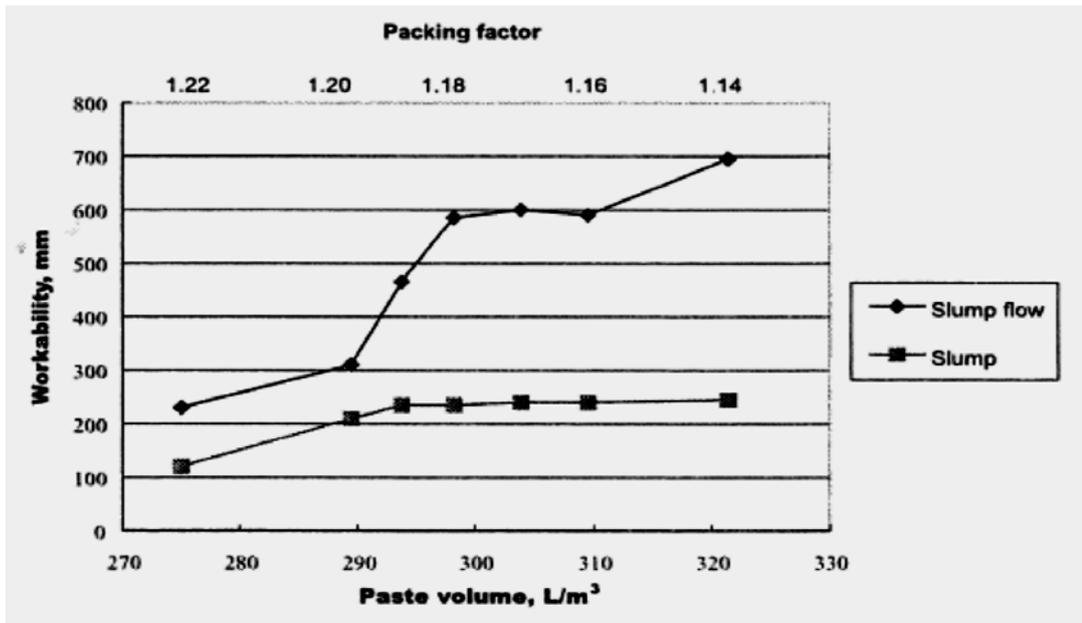


Figure 1.10.Effet du facteur de compacité (PF) sur l’ouvrabilité du béton (Su and Miao 2003) [23].

Les auteurs indiquent que le choix de ce paramètre est primordial pour atteindre la fluidité requise du béton car il détermine le volume de pâte et permet d’en déduire le dosage des granulats d’après les relations ci-après :

$$M_s = PF \times \rho_{\text{vrac, s}} \times \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) M_g = PF \times \rho_{\text{vrac, g}} \times \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) \dots \dots \dots (1.9)$$

M_s : Masse de sable par unité de volume de béton.

M_g : Masse de gravillons par unité de volume de béton.

$\rho_{\text{vrac, s}}$: Masse volumique en vrac du sable ;

$\rho_{\text{vrac, g}}$: Masse volumique en vrac des gravillons ;

$\frac{V_s}{V}$: Proportion volumique de sable apportée au volume total de granulat.

Cependant, ils ne précisent pas comment ce paramètre est obtenu. Par ailleurs, l’application de cette méthode conduit à un surdosage en granulats puisque qu’elle vise un niveau de serrage élevé et donc un dosage en super-plastifiant proche de la saturation pour assurer la fluidité du béton. La méthode mène en général à un dosage en ciment faible

(autour de 200 kg/m³) et à des résistances moyennes à la compression à 28 jours limitées entre 30 et 35 MPa [20].

1.4.3 Méthode d'optimisation du squelette granulaire

Dans un souci d'optimisation du squelette granulaire constitué d'un nombre quelconque de granulats. Sedran et De Larrard [24], ont développé le modèle d'empilement compressible. Ce modèle exprime la dépendance entre de la compacité atteinte et l'énergie de serrage fournie au système. La viscosité d'un mélange sec est remplacée par l'indice de serrage noté K qui est considéré comme une description du degré de serrage du système, inhérente au mode de mise en place. Le modèle met en avant la notion de compacité réelle en complémentarité avec celle de la compacité virtuelle. La compacité réelle est associée à un procédé physique de construction de l'empilement alors que la compacité virtuelle définit la compacité maximale théorique inatteignable dans la réalité. La compacité réelle d'un mélange de grains polydispersés dépend de trois paramètres principaux :

- La taille des grains considérés (décrite par la courbe granulométrique) ;
- La forme des grains (morphologie, état de surface) ;
- La façon dont l'empilement est réalisée.

L'indice de serrage pour une compacité réelle donnée peut être calculé à partir de la relation suivante :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \beta_i}{\frac{1-\phi}{\gamma_i}} \dots\dots\dots (1.10)$$

- y_i : Proportion volumique des classes de diamètre d_i.
- β_i : Compacité résiduelle des classes de diamètre d_i.
- φ : Compacité réelle du mélange
- γ_i : Compacité virtuelle du mélange avec la classe i est dominante

La Figure 1.11 montre l'évolution de la compacité réelle d'un mélange granulaire binaire pour différentes valeurs d'indice de serrage. Un indice de serrage de 7,0 pour les bétons auto-plaçant qui constituent des mélanges super-plastifiés est recommandé [25].

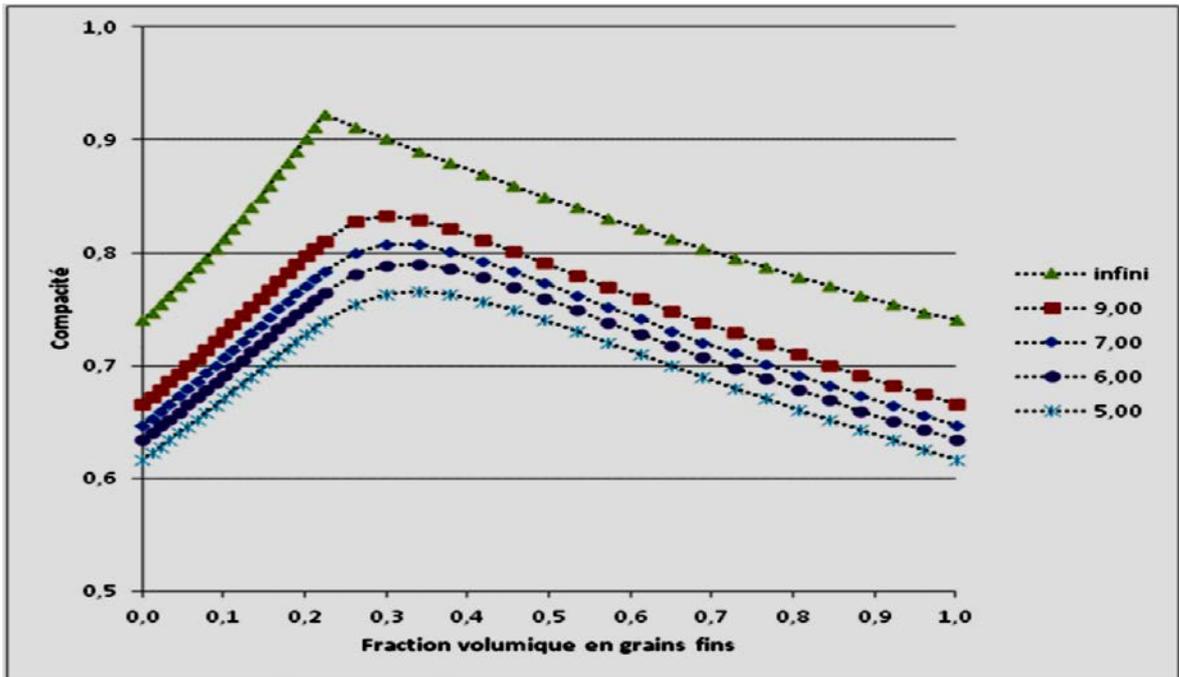


Figure 1.11 Rapport entre compacité réelle et indice de serrage pour un mélange binaire [25].

1.4.4 Approches basées sur la recommandation de l'AFGC

L'AFGC [26], a mis en place des techniques et des recommandations provisoires pour la caractérisation des BAP à l'état frais:

- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³ (de l'ordre de 40 % du volume total).
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.
- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1 afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées.
- Un diamètre maximal réduit, en général un Dmax compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement.
- Utilisation d'un super-plastifiant (à un dosage proche du dosage de saturation) pour obtenir la fluidité souhaitée.
- Emploi éventuel d'un agent de viscosité.

1.5 Rhéologie des BAP

La rhéologie est une science qui étudie l'écoulement des matériaux sous l'effet des contraintes. Il ya deux grandeurs physiques fondamentales qui composent la rhéologie. Une grandeur appelée contrainte de cisaillement qui donne création de mouvement et deux grandeurs physiques cinématiques appelées déformation et vitesse de cisaillement. Le but de la rhéologie est de décrire les réactions entre les contraintes, les déformations et les vitesses de déformation d'un élément de volume. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées. Le comportement rhéologique d'un matériau (figure 1.12) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 . Le fluide est considéré comme Binghamien si la courbe d'écoulement est une droite [27].

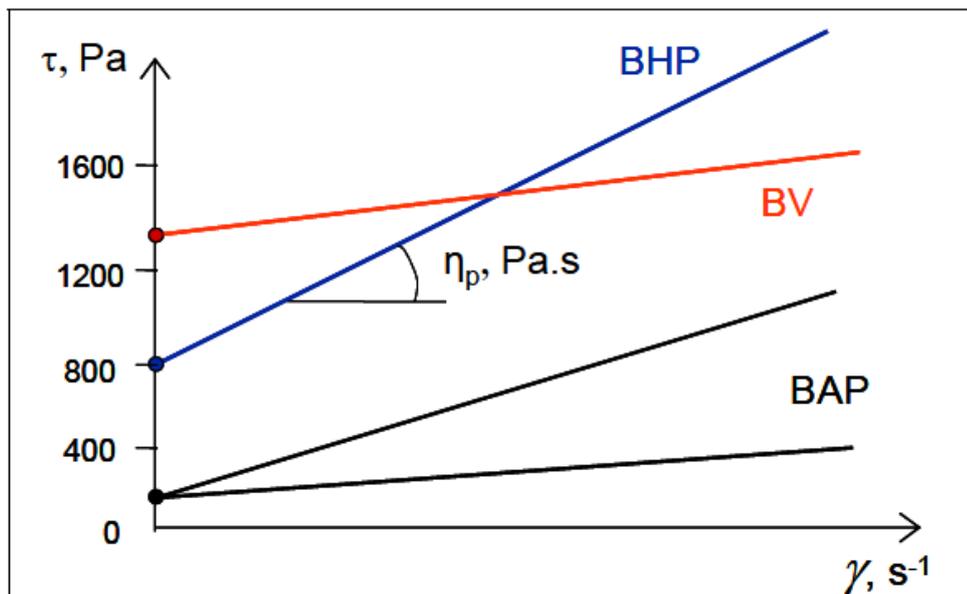


Figure 1.12: Comportements rhéologiques pour différents types de béton [27].

Différentes techniques sont employées et préconisées par les normes pour évaluer le comportement rhéologique des coulis et des bétons. Certaines sont implicites et faciles à utiliser sur chantier et d'autres nécessitent des appareils de pointe pour évaluer les constantes rhéologiques avec précision.

Les mesures réalisées sur bétons montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides Newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Les propriétés d'écoulement de béton peuvent souvent être décrites approximativement en utilisant un modèle de Bingham, définie par deux facteurs, la viscosité plastique et le seuil d'écoulement. Les tests empiriques les plus couramment utilisés (Essai d'étalement, la boîte en L, V-Funnel...) sont insatisfaisants car ils mesurent un seul paramètre qui n'est pas suffisant pour caractériser complètement la rhéologie du béton [28]. Actuellement il existe plusieurs types d'appareils, appelés rhéomètres, qui permettent de mesurer les paramètres rhéologiques du béton. Dans ce contexte, on présente quelques rhéomètres qui sont validés et utilisés pour évaluer les paramètres rhéologiques dans certains travaux de recherche.

a. Rhéomètres agitateurs-malaxeurs

Two-point test (rhéomètre de Tattersall), premier rhéomètre rotationnel à bétons fut créé en 1987. Il s'agit de la première tentative pour mesurer la contrainte induite à différents taux de cisaillement. Il se compose d'un cylindre creux rempli de béton et d'une ailette, qui tourne à une vitesse contrôlée. Le couple généré au cours de la rotation est mesuré (Figure 1.13). Cet appareil est conçu pour les bétons de grandes maniabilités (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams) [29].



Figure 1.13: Rhéomètre two-point-test [29].

b. Rhéomètres IBB

IBB est un rhéomètre rotatif. Il est dérivé de two-point test. Le principe de fonctionnement est identique. Il est constitué d'un agitateur en forme de H qui peut tourner en mouvement planétaire ou axial dans une cuve cylindrique fixe. Initialement conçu pour les bétons projetés par voie humide, l'IBB a été testé avec succès dans une large gamme de béton allant des bétons d'affaissement de 20 mm au cône d'Abrams, aux BAP, aux bétons hautes performances (BHP), aux bétons pompés, aux bétons de fibres, etc[30]. Les vitesses et les couples sont mesurés et enregistrés automatiquement, sur l'ordinateur à l'aide d'un capteur de vitesse et d'une cellule de charge placée sur l'arbre principal. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont donnés directement par l'appareil en unité machine, c'est-à-dire respectivement en (N.m) et (N.m.s). Il peut mesurer les paramètres rhéologiques de divers bétons jusqu'à des affaissements de 25 mm. Cet appareil est complètement automatisé et commercialisé sous le nom d'IBB (Figure 1.14).



Figure I.14:Rhéomètre à béton IBB [31].

c. Rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML)

C'est un rhéomètre rotatif [31]. Il est dérivé de l'appareil Two-point test (Figure 1.15). Le principe de fonctionnement est identique, mais la forme d'ailette a été modifiée. C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux. Le cylindre intérieur est fixe tandis que le cylindre extérieur tourne autour de l'axe à une vitesse angulaire fixe. Les cylindres sont munis de redans parallèles à leur axe. La géométrie de ce rhéomètre permet de développer facilement les équations et de déterminer les paramètres rhéologiques en unités

fondamentales. Le pilotage (vitesse de rotation, protocole opératoire), l'acquisition des résultats de mesures (couple et vitesse de rotation) et le calcul des résultats bruts sont entièrement automatisés et réalisés en temps réel à l'aide d'un logiciel spécifique. La consommation de béton est relativement importante au cours d'un essai (17 litres).



Figure 1.15: Rhéomètre BML.

d. Rhéomètre plan-plan

Le BT Rhéomest un rhéomètre développé par le LCPC au début des années 1990[32]. Un outil plan-plan est inséré dans ce rhéomètre sachant que le plan supérieur est en rotation alors que le plan inférieur est fixe (Figure 1.16). Il peut contenir 7 litres de béton environ. L'avantage de ce rhéomètre est que les paramètres rhéologiques sont calculés et obtenus directement en unité fondamentale. Il n'est pas nécessaire de calibrer l'appareil. Il est donc le seul rhéomètre susceptible de mesurer la viscosité plastique d'un béton. Les inconvénients sont liés à la géométrie de mesure qui entraîne une usure du joint d'étanchéité (à changer lors de chaque essai), de la mise en place et de la difficulté d'utilisation de ce rhéomètre.



Figure 1.16: Rhéomètre à béton BT Rhéom.

Des études ont conclu que les viscosités plastiques et les seuils de cisaillement varient fortement selon le rhéomètre utilisé. Néanmoins, les résultats suivent globalement la même variation et tous les rhéomètres ont donné le même classement des bétons vis-à-vis de leur viscosité plastique.

1.6 Propriétés des BAP à l'état durci

Nous résumons rapidement sous deux aspects (résistance et durabilité) les différences qui existent entre les propriétés des bétons auto-plaçants à l'état durci et celles des bétons ordinaires.

1.6.1 Résistances mécaniques

Le béton auto-plaçant est considéré comme un mélange diphasique à son état frais (phase solide et liquide), il possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée conférant au béton auto-plaçant une amélioration de résistance mécanique [33].

L'introduction des additions minérales dans les BAP entraîne une amélioration des résistances mécaniques par rapport au BAP sans aucune addition [34]. Cette amélioration de résistance est due à l'effet de remplissage, l'effet de surface et par l'effet chimique ou pouzzolanique lorsqu'elles sont réactives. Grâce à ces propriétés pouzzolaniques des additions, ces résistances mécaniques peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

Généralement l'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine aux bétons ordinaires. Aux très jeunes âges. Les résistances mécaniques des BAP et des bétons vibrés sont similaires sous des conditions comparables, mais les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment [35,36]. L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge (Figure 1.17), et leur dispersion dans le béton, leurs particules favorisent l'hydratation de ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure plus dense [37, [38]. Selon Klug [35], la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferrailage.

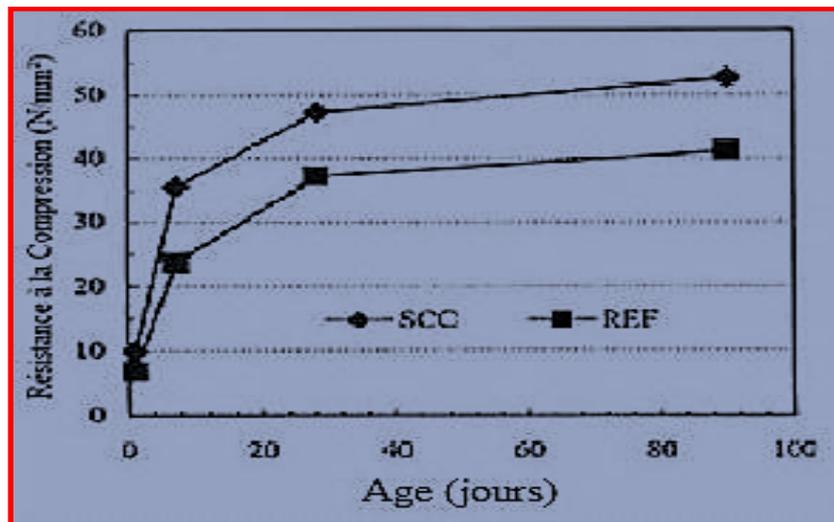


Figure 1.17: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [36].

Selon Kazim et al. [39], les résistances à la compression et à la traction des bétons autoplaçants avec ($E/C=0.38$) étaient plus élevées que ceux du béton ordinaire avec ($E/C=0.58$) pour tous les âges de test et pour toutes les conditions de cure (Figure 1.18).

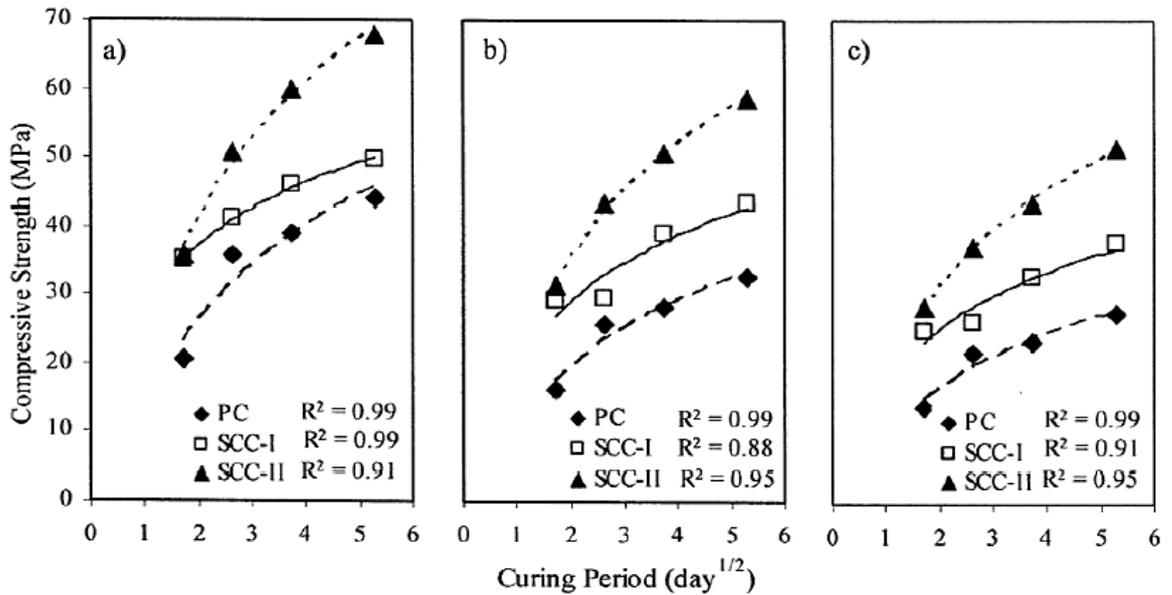


Figure 1.18: Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau, (b) couvert et (c) air [39].

1.6.2 Module de déformation longitudinal

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turkey et al. [40], ont montré une diminution du module d'élasticité des BAP avec l'augmentation de volume de pâte. Mais selon ces memes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. Le module d'élasticité des BAP est inferieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important des BAP. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des propriétés volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inferieur à celui des granulats) [27]. Assié et al. [41], ont trouvé que, d'une part et malgré qu'avec un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, d'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

1.6.3 Retrait et fluage

Selon Assié [41], pour une meme classe de résistance, le coefficient de dillatation thermique au jeune age (0-24h) est équivalent pour les BAP et les BO. Le retrait au jeune âge des BAP est superieur à celui des BO en particulier pour la faible gamme de resistance. Selon le meme auteur, les BAP subissent des déformations différés sous charges plus importantes que celle des BO dans la meme gamme de résistance. Les BAP et les BO présentent un retrait similaire à 28 jours. Au dela d'un an, les BAP présentent un retrait

légèrement supérieur à celui des BO qui peut être expliqué par le volume important de la pâte dans les BAP [27].

Persson [42], a étudié le fluage en compression de huit compositions de BAP de rapports E/C variant de 0.27 à 0.80, chargés de 2 à 90 jours et testés à quatre niveaux de contraintes. Ces résultats ont démontré que le fluage en compression du BAP ne diffère pas du fluage en compression d'un béton ordinaire. L'auteur a évalué aussi le retrait, le fluage et le module d'élasticité des BAP, et il a conclu que les valeurs de ces trois paramètres coïncident bien avec celles du béton vibré quand la résistance reste constante. Toutefois, d'autres travaux ont plutôt démontré que les BAP présentent un fluage en compression plus élevé par comparaison à un béton conventionnel [43]. Proust. [44], a remarqué que les déformations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement supérieurs dans le cas des bétons autoplaçants.

1.6.4 Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux dimensions des pores dans le mélange, plus les pores sont larges plus la perméabilité est grande. Si le rapport Eau/Ciment est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores capillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible. Pour les bétons contenant du laitier, les pores capillaires (diamètre supérieure à 100 Å) sont transformés en pores gellives (diamètre inférieure à 100 Å), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton [44]. Les bétons auto-plaçants possèdent une perméabilité intrinsèque inférieure à celle des bétons vibrés à classe de résistance équivalente, et pour des porosités accessibles à l'eau comparables [45]. Ils ont montré que cet effet est dû à l'ajout des fillers. Cette tendance s'inverse pour un BAP formulé sans fillers mais avec un agent de viscosité.

1.6.5 Absorption d'eau

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible, la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus

important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés [33]. La figure 1.19 montre que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes. Les BAP avec dosage élevé en cendres volantes accusent une grande absorption d'eau [47]. Par contre Assié [27], a rapporté une certaine ressemblance entre l'absorption capillaire des BAP et celle des bétons ordinaires.

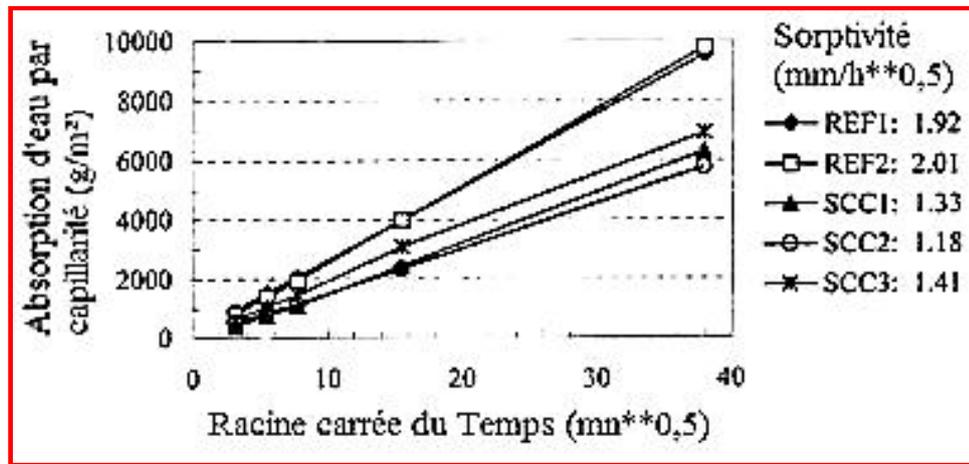


Figure 1.19: Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés selon [46].

1.6.6 Perméabilité au Gaz

La perméabilité au gaz est influencée par la quantité d'eau interstitielle, du rapport E/C et de la pression d'essai [48]. Le béton autoplaçant est généralement plus résistant à la pénétration d'un gaz tel que l'oxygène que le béton vibré correspondant, ainsi la perméabilité au gaz pour un BAP est plus faible que celle d'un béton vibré BV (Figure 1.20).

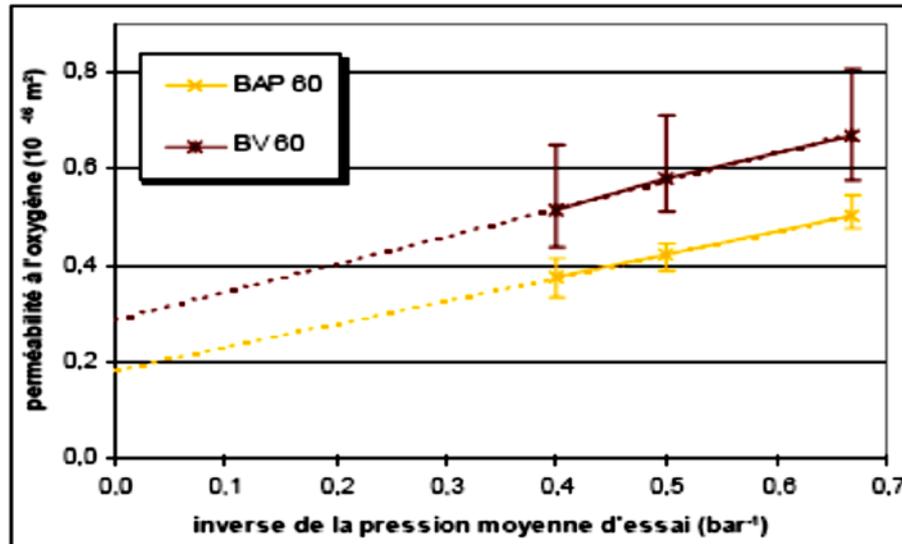


Figure 1.20 : Perméabilité à l'état sec des formulations de BHP [27].

Zhu et al. [46], ont aussi rapporté que la perméabilité des BAP est inférieure à celle des bétons ordinaires. Les comparaisons ont été réalisées à même quantité de ciment et rapport eau/ciment (E/C). La diminution de la perméabilité des BAP est attribuée à l'utilisation des additions minérales. Siad et al. [49], ont réalisé une étude de perméabilité sur un béton vibré à base de ciment Portland ordinaire et un BAP à base de filler calcaire, pour un même rapport E/L et même classe de résistance des bétons. L'étude a montré que la perméabilité des bétons ordinaires est de l'ordre de 2 à 3 fois plus importante que celle des BAP. Bien que le filler calcaire ne développe aucune activité chimique, sa contribution à la perméabilité est nettement meilleure que celle du béton vibré.

1.6.7 Perméabilité aux ions Chlore

Les ions chlore peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton, ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent

pratiquement pas le béton lui-même) [29]. Les BAP présentent des faibles valeurs de coefficient de perméabilité comparé aux bétons conventionnels de même résistance. Parmi trois mélanges de BAP, il a été montré que les BAP n'utilisant pas d'ajouts cimentaires mais un agent de viscosité pour maintenir la stabilité du mélange à l'état frais, ont la plus grande perméabilité et le plus grand coefficient de diffusion des ions en solutions [50]. Les ajouts cimentaires sont donc bénéfiques pour diminuer la perméabilité des BAP.

Les résultats obtenus par Zhu et al 2005 [45], révèlent que les BAP ont une meilleure résistance à la diffusion des ions de chlorure que les BV pour une résistance donnée. La résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton [46]. Les bétons formulés avec (BAP SCC1) ou sans filler calcaire (BAP SCC3) et béton vibré (REF1) présentent des coefficients de migration des ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire (Figure 1.21). Ces auteurs indiquent également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons.

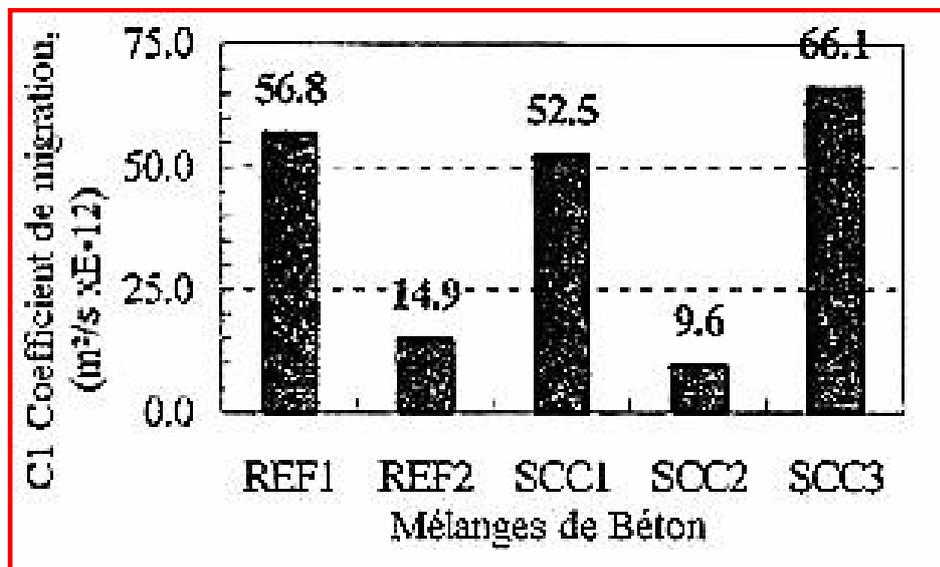


Figure 1.21 : Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants [46].

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de la figure I.28, en prenant le BAP SCC1 comme référence, la quantité de ciment est moins importante dans le BAP SCC3 ce qui engendre une augmentation du rapport E/C et conduit à une structure poreuse plus grossière. Ainsi, le coefficient de diffusion est diminué quel que soit l'âge de l'essai. Dans

le BAP SCC2, la quantité de ciment plus importante a conduit cette fois-ci à un coefficient de diffusion plus faible que le BAP SCC1. Ceci prouve bien l'influence importance du rapport E/C sur le coefficient de diffusion des bétons. Certains auteurs [51], ont évalué le comportement de bétons autoplacants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions Chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10⁻¹² m²/s au lieu de 15 à 18.10⁻¹² m²/s). Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

I.7Conclusion

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, mais leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Les propriétés des BAP qui ont été abordées dans ce chapitre sont: la fluidité, l'homogénéité, la résistance mécanique et la durabilité.

Le béton autoplacant diffère du béton ordinaire vibré par son grand volume de pâte et l'utilisation des additions minérales.

Les additions minérales améliorent la rhéologie du béton autoplacant, sa résistance à la compression et sa durabilité.

La synthèse bibliographique a montré que peu d'études ont été réalisées sur la performance des BAP dans un climat chaud et sec ainsi que l'effet de la cure humide initiale sur cette performance.

CHAPITRE II :

LE CIMENT ET LES AJOUTS CIMENTAIRES

CHAPITRE II : LE CIMENT ET LES AJOUTS CIMENTAIRES

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde après l'eau, cependant, la fabrication de ses constituants consomme beaucoup d'énergie et dégage du gaz carbonique.

L'utilisation des additions minérales comme ajouts cimentaires est l'une des solutions pour réduire la consommation d'énergie et réduire le dégagement des CO_2 . Les additions minérales contribuent aussi à l'amélioration de la qualité du béton. L'accroissement des performances mécaniques des bétons a été jusqu'ici obtenu par la réduction de la porosité obtenue grâce à l'emploi des ajouts cimentaires. Toutefois, cette utilisation des additions minérales est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

2.2 Le ciment Portland

Le ciment Portland est obtenu après traitement thermique à 1450°C d'un mélange d'argile et de calcaire [52]. Le produit obtenu après calcination et broyage est le Clinker auquel on rajoute une faible quantité de gypse pour retarder la prise lors de l'hydratation assurant ainsi une meilleure maniabilité. (Figure 2.1).

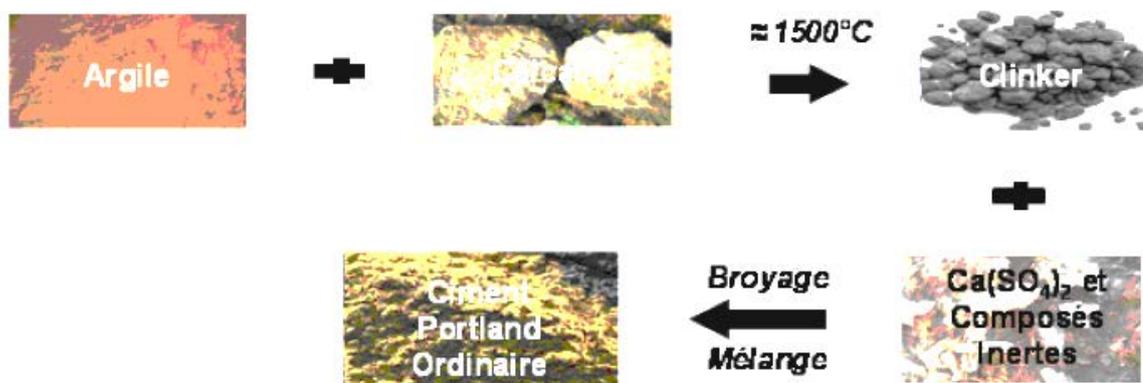


Figure 2.1 : Schéma de confection d'un ciment Portland Ordinaire [52].

La qualité du ciment portland dépend de sa composition chimique et minéralogique [53]. La composition chimique est généralement donnée sous forme d'analyse élémentaire en

oxydes principaux : SiO_2 , CaO , Al_2O_3 et du Fe_2O_3 . Leurs pourcentages massiques sont regroupés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Composition chimique des clinkers portland

Clinker	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2
%en masse	62-68%	4-8%	2-5%	21-24%

Durant l'opération de cuisson du ciment Portland, l'oxyde de calcium se combine avec les composés alumineux, siliceux et l'oxyde de fer pour former les quatre composés principaux : C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF (Figure 2.2).

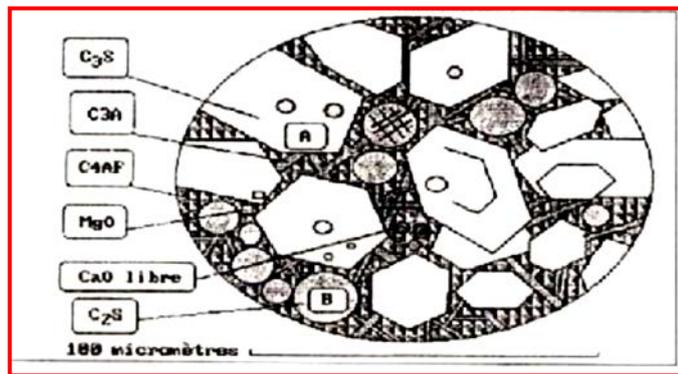


Figure 2.2: Dessin représentant les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker [54].

La composition minéralogique moyenne du clinker obtenu, à partir de la composition chimique citée avant, est représentée dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Composition minéralogique des clinkers portland [55]

Phase	C_2S	C_4AF	C_3A	C_3S
Clinker Portland	15 à 35%	10 à 18%	4 à 14%	45 à 65%

Le ciment contient aussi des composés mineurs qui proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion de leurs constituants, définis dans la norme Européenne EN 197- 1 [54]:

- Le ciment portland (CEM I).
- Le ciment portland composé (CEM II /A ou B).
- Le ciment de haut fourneau (CEM III).
- Le ciment pouzzolanique (CEM IV).
- Le ciment au laitier et aux cendres (CEM V/A ou B).

La Figure 2.3 présente une évolution schématique de l'avancement de l'hydratation du ciment en pâte dans de l'eau en fonction du temps. Quatre étapes peuvent être mises en évidence [52].

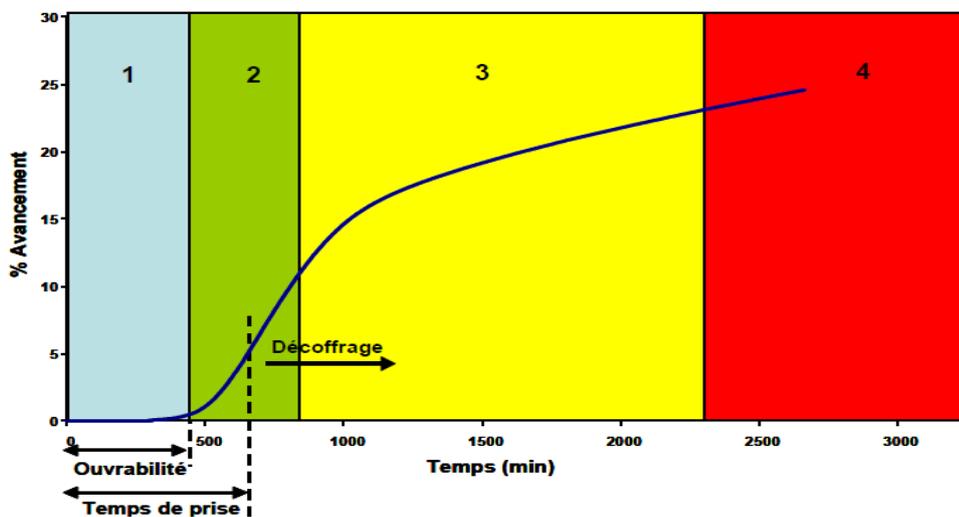


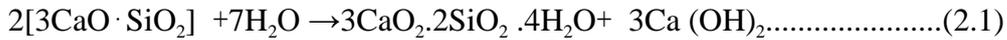
Figure 2.3: Evolution schématique de l'avancement de l'hydratation en pâte du ciment Portland Ordinaire en fonction du temps [52].

Les réactions d'hydratation sont généralement plus complexes qu'une simple conversion en hydrates. La prise du ciment est le processus d'évolution du système vers un mélange consistant et le développement de propriétés mécaniques remarquables. Du fait de la complexité du système à étudier, les travaux sur la chimie de l'hydratation du ciment Portland se sont focalisés sur les phases les plus importantes [56].

- L'adsorption: Fixation physique ou chimique en surface des molécules d'eau.
- L'hydrolyse : Transformation du solide et décomposition de l'eau.
- Dissolution/Solvatation: Rupture des liaisons ioniques dans le cristal et dispersion des ions dans le liquide qui sont rapidement hydratés.
- Cristallisation: Elle a lieu en deux parties, la germination (ou nucléation) qui consiste à former des assemblages (germes) aléatoirement, puis la croissance des germes qui

s'effectue par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide/solide.

Les mécanismes d'hydratation du C₃S et C₂S sont relativement similaires. L'hydratation du C₃S conduit à la formation de deux produits distincts : la phase C-S-H (Silicates de calcium hydratés) et la phase CH (Portlandite) suivant la réaction :



Ou en notation abrégée :



La figure 2.4 montre la formation de la phase C-S-H et portlandite.

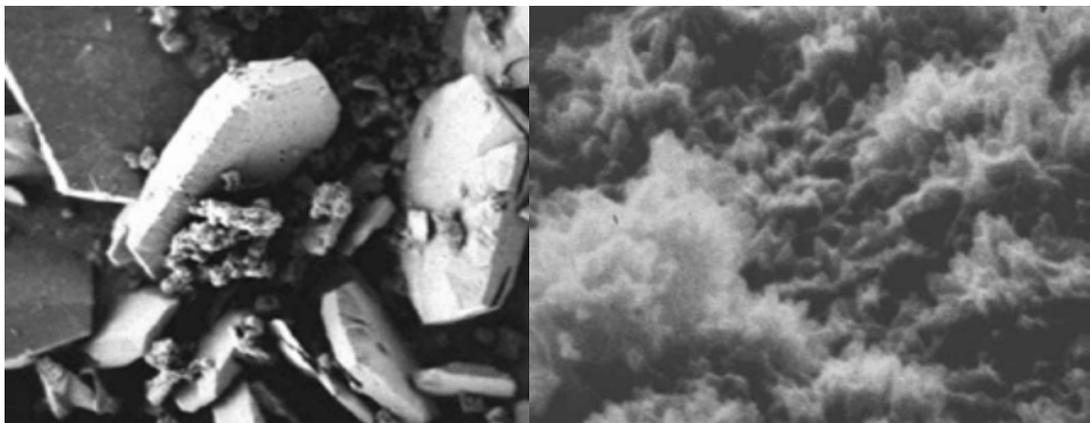


Figure 2.4: CSH (a), Portlandite (b) d'après Taylor 1997 cité par [56].

L'hydratation du C₃A s'effectue très rapidement en présence d'eau pour former des phases hydratées intermédiaires (C₄AH₁₉, C₄AH₁₃, C₂AH₈) ou encore appelées AFM. Ces phases évoluent ensuite vers une phase plus stable (C₃AH₆) à une vitesse qui dépend fortement de la température, du rapport liquide/solide d'hydratation, de la taille des grains et de la concentration en CO₂.

L'hydratation des phases C₄AF est semblable à celle de C₃A lorsque les conditions d'hydratation sont identiques.

La cinétique globale d'hydratation est contrôlée par l'hydratation du C₃S. Les cinq phases successives de l'évolution de la chaleur dégagée pendant l'hydratation du ciment Portland peuvent être distinguées (Figure 2.5).

2.3 Réactions initiales

Durant cette phase les différents ions entrent rapidement en solution. Cette dissolution est rapide (la période dure quelques minutes) et de nature exothermique. La dissolution des sulfates alcalins et des sulfates de calcium libère les ions de K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} et Ca^{2+} , SO_4^{2-} respectivement. Les phases de C_3S et C_3A , ainsi qu'une petite quantité de C_2S de et C_4AF se dissolvent. La surface des particules de ciment devient partiellement recouverte de C-S-H et d'ettringite. Les phases de silicates de calcium contribuent également à l'augmentation de la concentration de Ca^{2+} et OH^- dans la phase liquide.

2.3.1 Période d'induction (période dormante)

Après la phase initiale rapide, la vitesse d'hydratation diminue de façon significative. L'hydratation progresse très lentement pendant quelques heures suivantes (phase II sur la Figure 2.5). La période dormante est liée avec la formation d'une couche imperméable des hydrates (le C-S-H et l'ettringite) à la surface des particules du ciment. La concentration de Ca^{2+} et OH^- dans la solution atteint son maximum durant cette période et commence à diminuer. Les ions SO_4^{2-} , consommés par la formation de l'ettringite, sont renouvelés suite à la dissolution des sulfates de calcium.

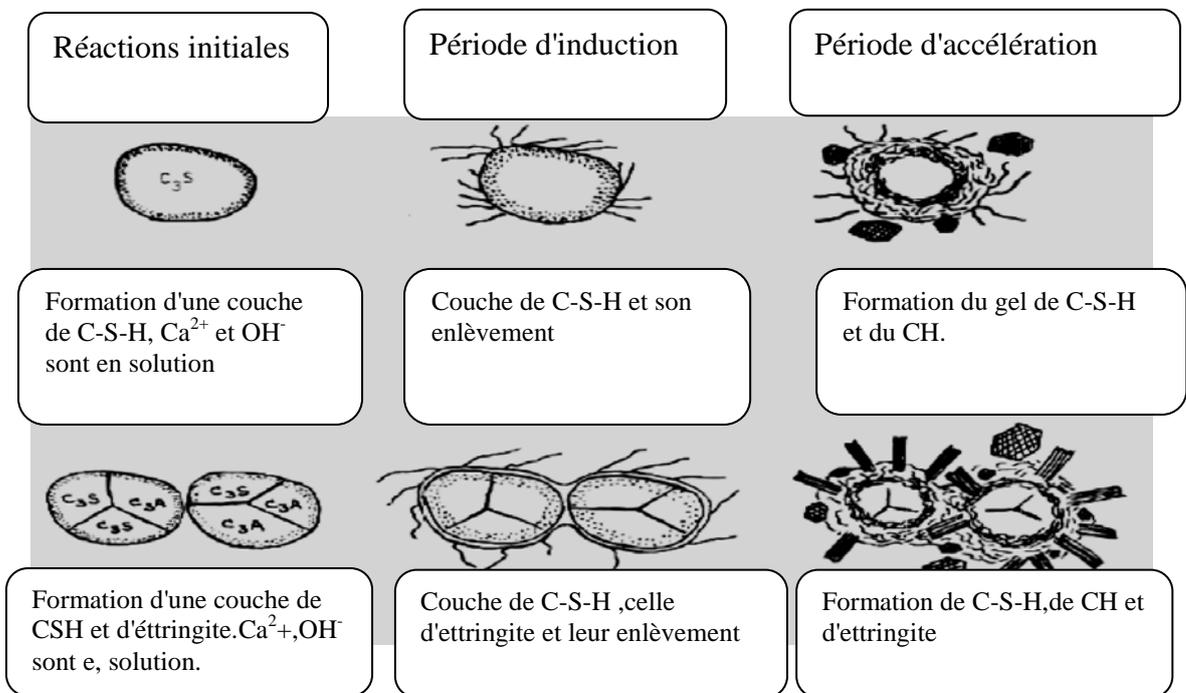


Figure 2.5: Séquence schématique des réactions de C_3S pure (A) et de C_3S+C_3A +gypse (B) (modifié de Jennings et Pratt, 1980) [57].

2.3.2 Période d'accélération (3-12 h après le contact eau-ciment)

Lors de cette période, une accélération du processus d'hydratation a lieu avec la dissolution, la nucléation et la précipitation de différentes phases. Ces processus provoquent un fort dégagement de chaleur. La portlandite se cristallise et la concentration des ions Ca^{2+} diminue. Les sulfates sont consommés par la formation d'ettringite et la concentration des ions SO_4^{2-} diminue également. Les hydrates formés (le C-S-H et l'ettringite) commencent à s'enchevêtrer et créent un matériau solide.

2.3.3 Période de ralentissement

Après avoir atteint son maximum, le taux d'hydratation commence à diminuer graduellement, car la quantité des phases non-hydratés diminue. Lors de cette période, le développement d'hydratation est contrôlé par la diffusion. Lorsque les sulfates sont épuisés, la conversion d'ettringite en monosulfoaluminate a lieu. Dans les systèmes avec le rapport eau/liant élevé, les réactions peuvent continuer pendant des mois en consommant les phases non-hydratés (phase V). Les figures 2.6 et 2.7 représentent respectivement le taux d'hydratation des différentes phases de clinker et le taux de formation des différents produits au cours de l'hydratation d'un ciment portland typique [58].

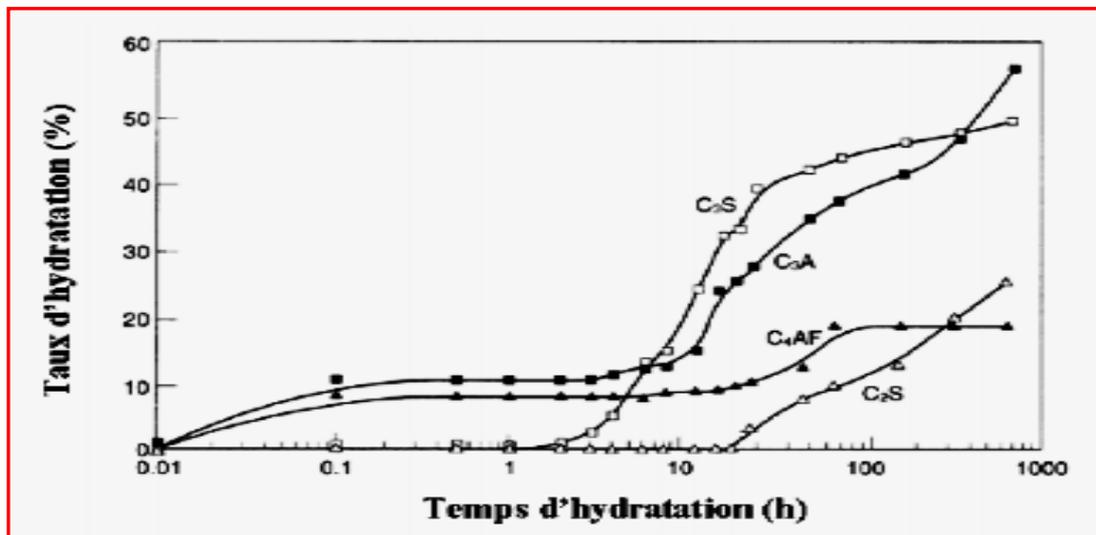


Figure 2.6: Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: consommation des phases du clinker [58].

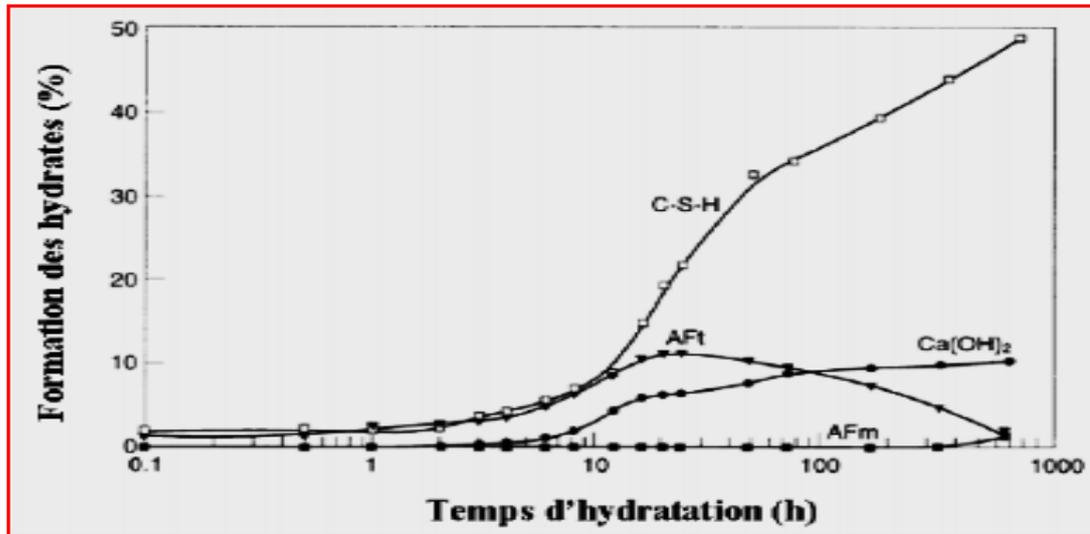


Figure 2.7: Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: formation des hydrates [58].

2.4 Les ajouts minéraux

2.4.1 Définition

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés à du ciment Portland, influencent les propriétés du béton durci par action hydraulique, pouzzolanique ou les deux [59]. Elles peuvent être aussi inertes chimiquement. Les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF), la fumée de silice, les pouzzolanes naturelles et les fillers calcaires en sont des exemples courants [60]. Ces ajouts cimentaires sont des poudres minérales qui sont élaborées par le concassage de matières premières (naturelles) ou de sous-produits industriels. Leur granulométrie est voisine de celle du ciment ou plus fine. Ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis de la compacité, de la viscosité et donc de la durabilité.

2.4.2 Réactivité des additions

Les additions cimentaires peuvent présenter différents types de réactivité chimique. Trois types sont généralement cités : hydraulique, pouzzolanique et inerte [61].

2.4.3 Matériau hydraulique

L'hydraulicité peut être définie comme la capacité d'un matériau à faire prise dans l'eau, c'est-à-dire que sa composition chimique suffit à former des phases liantes. Certains matériaux peuvent toutefois nécessiter une activation pour réagir (souvent par le pH, parfois par les sulfates). On parle alors de matériaux hydrauliques latents.

2.4.4 Matériau pouzzolanique

Les ajouts actifs présentent des structures amorphes. Avec la chaux et en présence d'eau, ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique à condition que le niveau d'énergie libre au départ soit suffisamment élevé pour aboutir à un système plus stable ayant des propriétés hydrauliques. Ces matériaux pouzzolanique sont définis par le fait qu'ils consomment la chaux pour former des hydrates liants. La chaux agit dans ce cas à la fois comme un activateur, puisque le pH permet la mise en solution de SiO_2 et Al_2O_3 , et comme un réactif puisque qu'elle est consommée pour former les phases liantes.

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes se déroulent somme suit [54]:



On assiste alors à une transformation de la portlandite (CH) (composant peu stable chimiquement et physiquement) en silicates de chaux hydratés relativement stables (C-S-H).

2.4.5 Matériau inerte

Un matériau ne formant pas de phases liantes est souvent considéré comme inerte. Toutefois, un matériau ni hydraulique ni pouzzolanique peut présenter une réactivité modérée vis-à-vis d'autres phases ou d'autres éléments. Typiquement, les fillers calcaires sont considérés inertes, s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau même s'ils peuvent réagir avec les aluminates pour former des carbo-aluminates, même s'il n'a pas été démontré que la formation de ces phases soit responsable d'un accroissement des résistances mécaniques par effet chimique.

2.5 Classification des additions

2.5.1: Ajouts minéraux actifs : Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les ajouts minéraux actifs suivants :

- Les cendres volantes,
- Les laitiers de haut fourneau,
- Les fumées de silice.
- Les pouzzolanes naturelles.

2.5.1.1 Les fumées de silice

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication silicium métallique ou de divers alliages de ferrosilicium [61]. Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Les particules sont souvent inférieures au micron. La surface spécifique varie de 20 à 25 m²/g. Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons [61]: action physique, physicochimique et pouzzolanique. En effet, l'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui plastifie le béton ayant un rapport E/L de 0,15 à 0,20. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de 0,1 mm de diamètre à partir de l'âge de 7 jours, ce qui rend le béton à la fumée de silice tout à fait imperméable. L'action pouzzolanique permet en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation de produire un CSH très dense qui permet des gains de résistances en compression dès l'âge de 7 jours.

a. Composition chimique

Les fumées de silice sont composées principalement de dioxyde de silicium amorphe et se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 µm (Figure 2.8). Elles sont produites lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Les fumées de silice sont recueillies par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion. Elle s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2000°C. Une fois refroidie, elles se condensent pour être captée dans des poches de tissu. Ensuite, elles seront traitées pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules. Leur surface spécifique est de 20 à 25 m²/g. La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95% [60, 62]. Le Tableau 2.3 donne la composition chimique typique de la fumée de silice.

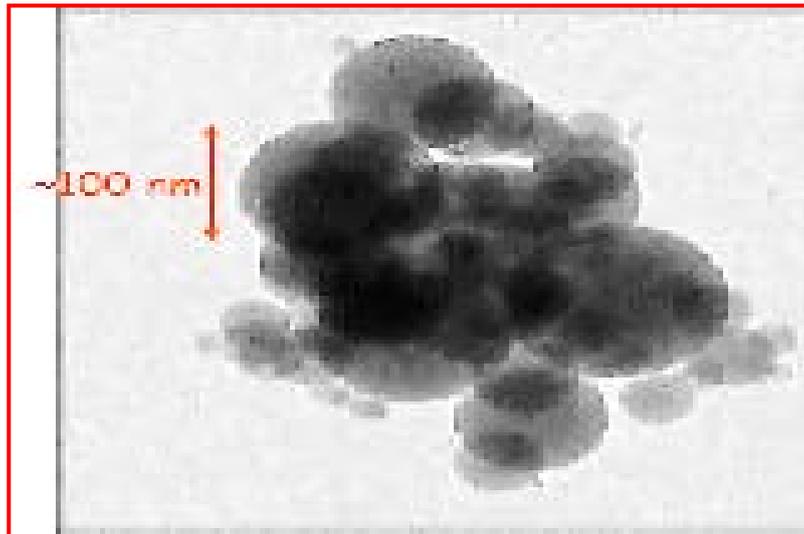


Figure 2.8: Les particules de fumée silice.

Tableau 2.3:Composition chimique de la Fumée de silice

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PAF
%	94.17	0.21	0.32	0.50	0.47	0.12	0.07	1.17	n.m	0.04	2.77

b. Influence sur les propriétés du béton frais

Plusieurs études, montrent que la présence de fumée de silice accélère la réaction d’hydratation du ciment portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice est important lorsque celles-ci sont utilisées avec un fluidifiant. Cet effet accélérateur des fumées de silice sur l’hydratation du ciment, combiné à l’effet de remplissage dû à leur extrême finesse peut conduire à de meilleures résistances du béton à court terme [54].

Les particules fines de fumée de silice agissent par leur effet filler en remplissant les microspores, ce qui conduit à une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. Ceci libère l’eau qui a été emprisonnée dans les pores et permet une réduction de la demande en eau pour une consistance fixe. Compte tenu de leur surface spécifique élevée, il peut y avoir une adsorption d’eau et par contre une augmentation de la demande en eau dépendant du rapport E/L, de la présence de super-plastifiant, de la teneur en ciment et de la concentration en fumée de silice. D’autre part, la combinaison de la fumée de silice avec

le superplastifiant améliore l'ouvrabilité du béton et contribue à la dispersion des grains de ciment [63]. Buil et al. [64], montrent que les fumées de silice de granulométrie plus étendue sont plus favorables au maintien de la maniabilité des bétons.

Selon Adjoudj [65], les mortiers, comportant des additions de fumée de silice, possèdent une viscosité plastique accrue avec le taux de substitution. Lorsque cette addition possède une grande finesse et par suite une grande demande en eau, ce qui influe négativement sur la valeur de la viscosité. En utilisant différents types de super-plastifiants, l'incorporation de la fumée de silice entraîne une augmentation linéaire du seuil de cisaillement avec le taux de substitution (Figure 2.9).

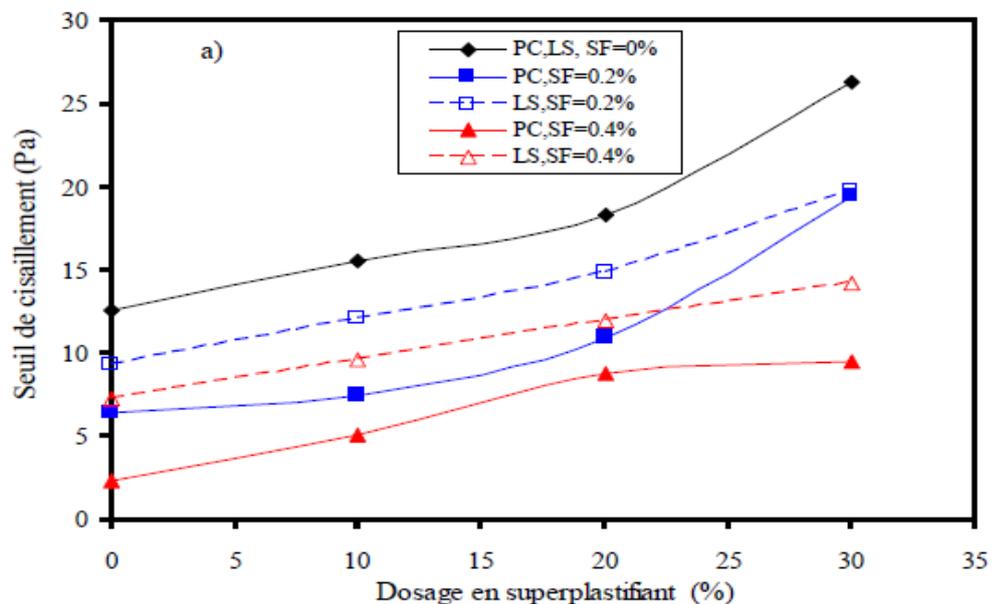


Figure 2.9: Variation du seuil de cisaillement des mortiers à la fumée de silice pour différents types et dosages en super plastifiants [65].

Selon les résultats d'Aitcin et al. [7], la viscosité augmente rapidement en fonction du dosage en fumée de silice sans l'utilisation de superplastifiant. Park et al. [66], ont montré, en étudiant les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additions minérales en utilisant le rhéomètre, que dans les mélanges ciment-additions de fumée de silice, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition (Figure 2.10).

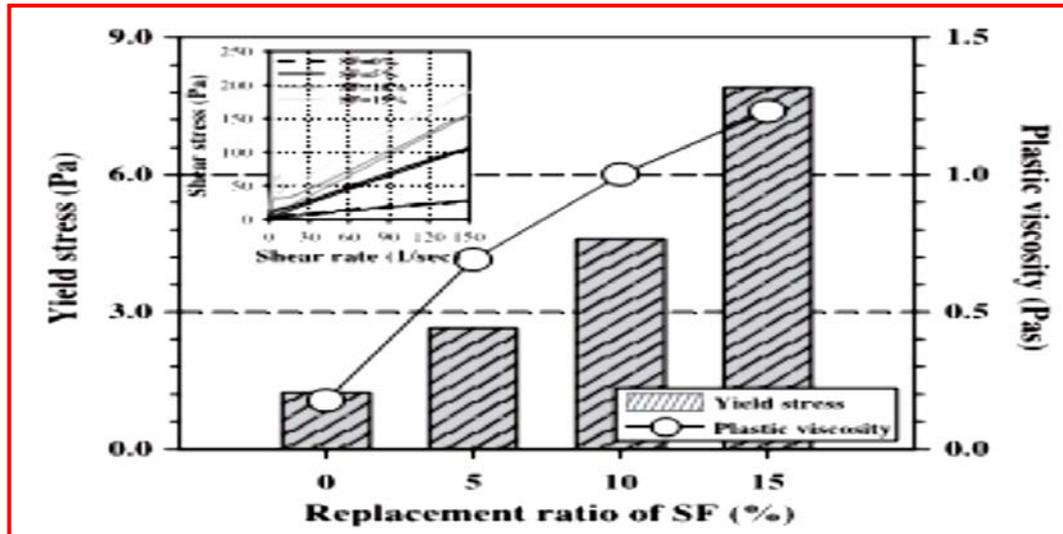


Figure 2.10: Effets des taux de remplacement en SF sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [66].

c. Influence sur les propriétés du béton durci

La fumée de silice améliore la résistance en compression, la résistance au gel – dégel, la résistance à la pénétration des ions chlore, la résistance aux attaques par les sulfates et la résistance à la réaction alcali – granulat. Cet effet s’explique par le raffinement et la segmentation de la porosité capillaire engendrée par l’hydratation des sphères de fumée de silice. Le taux de remplacement optimal se situe aux environs de 10% [60].

Les fumées de silice améliorent l’adhérence entre le béton et les armatures d’acier par diminution du ressuage interne au niveau de l’interface béton-armature. Il y a formation d’une zone de transition dense. L’amélioration de l’adhérence est significative pour des additions de fumée de silice supérieures à 20%.

Les fumées de silice peuvent aussi neutraliser les réactions alcalis-granulats en augmentant le degré de polymérisation des CSH, ce qui réduit la mobilité des alcalis et des hydroxydes dans les solutions des pores.

L’introduction de la fumée de silice a peu d’effets sur le risque de carbonatation. L’effet est également minime dans le cas de la résistance aux cycles de gel-dégel avec des bétons de rapport E/L de 0,4 et des additions de fumée de silice de 15% ou moins. La résistance diminue pour des additions de 20 à 30% de fumée de silice et des rapports E/L variant de 0,35 à 0,55. Cependant La fumée de silice n’est pas qu’une pouzzolane très réactive, elle a

d'autres propriétés intéressantes. En effet, la petite taille des particules de fumée de silice permet de combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore donc le remplissage des vides. La Figure 2.11 montre l'efficacité de l'ajout des fumées de silice comparée à celle du ciment Portland ordinaire, pour un rapport eau/ciment = 0.25 [67].

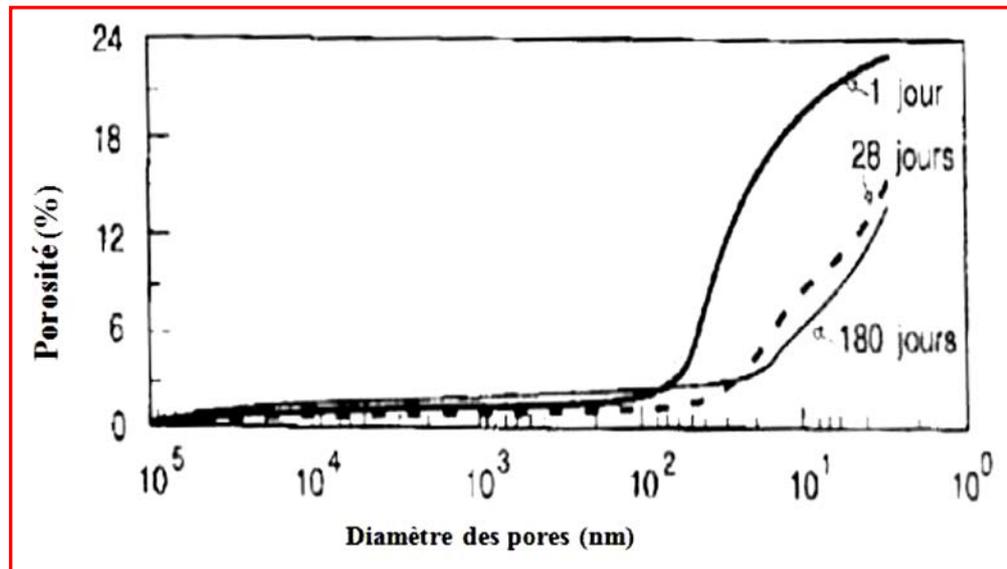


Figure 2.11: Courbes porosimétriques montrant l'influence de l'ajout des fumées de silice sur la dimension des pores en fonction du temps d'hydratation [67].

2.5.1.2 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Ce résidu est évacué de la chambre de combustion d'un fourneau par les gaz qui s'en échappent [68]. Pendant la combustion, presque toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés. Les impuretés du charbon telles que l'argile, le feldspath et le quartz entrent en fusion et sont évacués de la chambre à combustion par les gaz d'échappement [68]. Durant cette étape, le matériau fusionné refroidit et se solidifie en petites particules sphériques vitreuses nommées cendres volantes. La cendre volante (CV) est ensuite extraite des gaz d'échappement à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou de sacs filtrants. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Elles sont sous forme de particules sphériques vitreuses (Figure 2.12), pleines ou creuses. La granulométrie

s'échelonne de 1 à 200 μm et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30 μm . leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg (domaine analogue à celui des ciments).

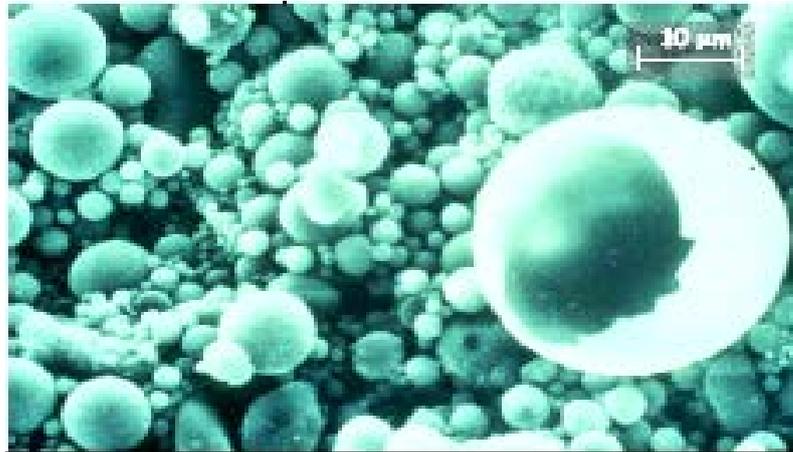


Figure 2.12 : Les particules des cendres volantes.

a. Composition chimique et minéralogique

La cendre volante est constituée principalement de verre de silicate contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone. L'alcalinité de la solution interstitielle du ciment permet d'augmenter la cinétique de dissolution des particules de cendres donc d'augmenter leurs cinétiques d'hydratation [69]. Selon la norme ASTM C618-94 les cendres volantes sont classées d'après leur teneur en calcium.

- Les cendres de classe C sont riches en chaux ($\text{CaO} > 10\%$), avec une teneur en oxyde supérieur à 50%. Elle est qualifiée de silicocalcaire avec un potentiel pouzzolanique élevé.

- Les cendres de classe F sont riches en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$). Elle est qualifiée de silico-alumineuse avec un faible potentiel pouzzolanique.

Les cendres volantes de lignite et de charbon ne se placent pas dans la même zone du diagramme triangulaire $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ (Figure 2.13). Les cendres Sulfo-calciques (lignite) sont proches des clinkers et des laitiers. A ce titre, elles peuvent être considérées

comme de véritables ciments. Elles feront prises en la seule présence d'eau. Les cendres Silico-alumineuses (charbon) proches des pouzzolanes ne pourront présenter des qualités d'hydraulicité que dans un milieu basique, généralement assuré par un ajout de chaux.

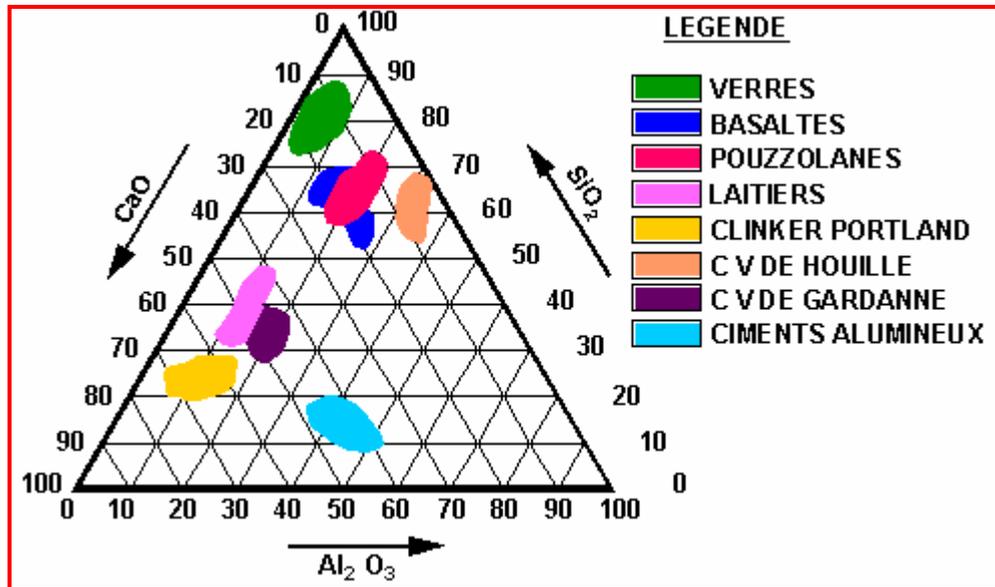


Figure 2.13: Diagramme triangulaire de kiel $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ [68].

L'analyse minéralogique des cendres volantes révèle normalement la présence de 50 % à 90 % de particules non cristallines, et de quelques phases cristallines. La réactivité des cendres volantes est principalement liée à la phase non cristalline.

b. Influence sur les caractéristiques des mortiers et des bétons frais

Le fait que la substitution partielle du ciment Portland par des cendres volantes dans le béton entraîne une réduction de la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'une consistance donnée ou une augmentation de l'ouvrabilité et de l'affaissement pour une quantité d'eau donnée est bien connu. La figure 2.14 montre que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes [70]. Dans le même contexte, Lange et al. [71], ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau de gâchage et augmentait la fluidité du mélange. Ce comportement a été expliqué par la forme sphérique des particules qui facilitent l'empilement granulaire et réduisent les frictions inter-particulaires [72, 73].

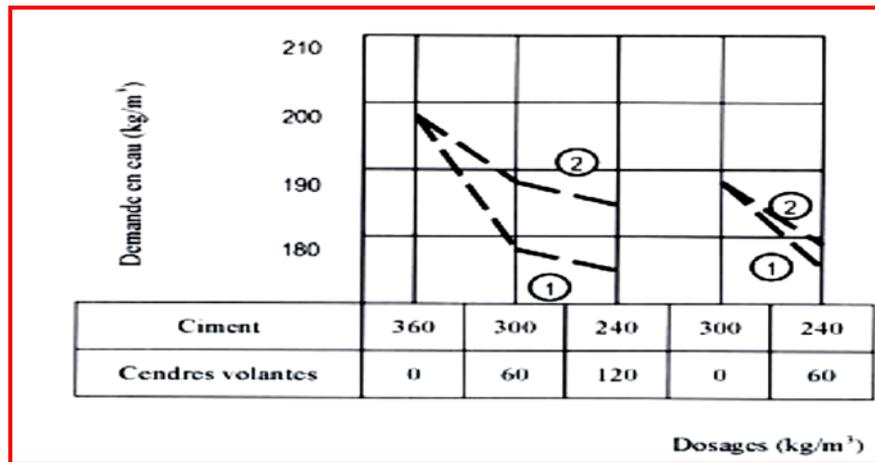


Figure 2.14: Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes 1 et 2 dans une formulation de béton [70].

Selon Venuat [74], les cendres volantes agissent par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique améliorent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons. Ceci est d'autant plus marqué que les cendres volante permet de diminuer la quantité d'eau pour une même ouvrabilité, d'augmenter l'homogénéité et la compacité du béton et d'améliorer sa mise en place. De même, la chaleur d'hydratation dégagée lors de la prise diminue régulièrement avec le pourcentage de cendre ajouté. Ceci est intéressant dans le cas de bétonnage d'ouvrages en grande masse ou par temps chaud.

c. Influence sur les caractéristiques des mortiers et des bétons durcis

Le type de cendres volantes utilisées et la température de cure exercent une forte influence sur le développement de la résistance du béton contenant des cendres volantes. L'utilisation de cendres volantes pauvres en calcium (types F et CI définis dans la norme CSA) se traduit généralement par une réduction de la résistance du béton à la compression initiale (jusqu'à 28 jours) et une augmentation subséquente de la résistance (en raison de l'activité pouzzolanique des cendres volantes) par rapport à du béton de ciment Portland de résistance à la compression à 28 jours semblable. L'utilisation de cendres volantes riches en calcium (type CH défini dans la norme CSA) n'a qu'une très faible incidence sur le développement de la résistance. Les recherches effectués par Manai [75], sur l'influence des cendres volantes sur les caractéristiques des bétons à l'état durci ont montré que :

- Généralement, le développement des résistances mécaniques à jeune âge (3jours) diminue avec l'utilisation des cendres volantes, surtout celles de la classe F, et augmente à long terme.

- La perméabilité du béton à l'eau et à l'air augmente, surtout si le béton est mûri à l'air à jeune âge. La cendre volante réduit la perméabilité aux ions chlorures.
- En remplaçant du ciment par de la cendre volante, il y a plus de carbonatation du béton à cause de la faible réactivité pouzzolanique des cendres. Ce qui retarde le remplissage des pores dans les bétons ordinaires($E/L=0.55$).
- La résistance au gel est légèrement diminuée dans le cas d'une addition de cendres volantes. Cette diminution est assez limitée pour 20% de cendres et on opérant à ouvrabilité égale. Celle-ci est due, en partie, à l'absorption d'une partie de l'agent entraîneur d'air par les cendres volantes lors de son addition au béton. C'est pourquoi le ciment incorporant des cendres nécessite généralement une quantité d'adjuvant plus élevée pour obtenir la même teneur en air.

Heba [76], a observé que le BAP avec 10% de cendres volantes et 10% de fumée de silice comme substituant donne la résistance du béton à la compression la plus élevée. La plus grande valeur de résistance à la compression est obtenue avec les d'échantillons durcis dans l'eau pendant 28 jours et la valeur la plus faible est obtenue pour les échantillons conservés à l'air libre.

Moustapha [77], a met en évidence l'influence de la quantité de cendres volantes dans les mélanges dont le liant est constitué de ciment seul. Il a noté que les résistances en compression ainsi que les cinétiques de durcissement diminuent logiquement en fonction de l'augmentation du taux de cendres volantes (Figure 2.15).

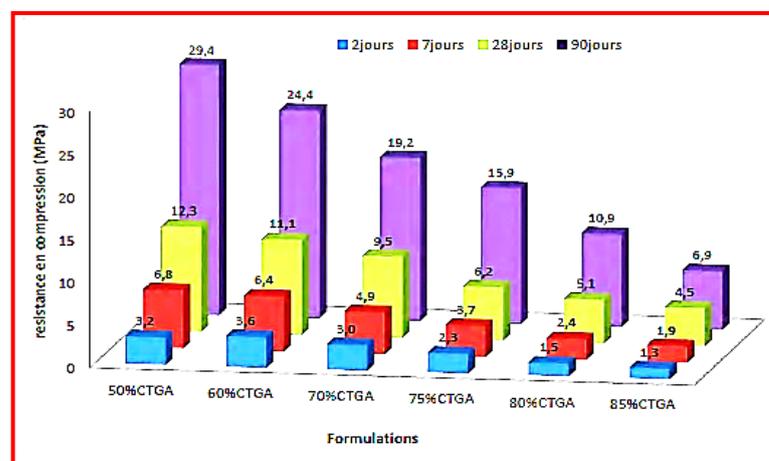


Figure 2.15: Influence du % de CTGA sur les résistances en compression (MPa) des mélanges après 2, 7, 28, et 90 jours de cure endogène [77].

La réduction de la porosité a été observée de façon qualitative et/ou quantitative dans de nombreuses études microstructurales de pâtes de ciments + cendres volantes, et il y a un agrément général sur le fait que les cendres volantes réagissent avec la chaux dans l'environnement alcalin d'un ciment hydraté [77].

La perméabilité de tuyaux en béton avec et sans cendres volantes a été mesurée à 28 jours et 6 mois et les résultats ont montré que la perméabilité était directement reliée au temps d'hydratation [77]. En effet, à 28 jours, alors que la réaction pouzzolanique en est à ses débuts, les bétons de cendres volantes sont plus perméables que les témoins ; à 6 mois, très probablement grâce à la réaction pouzzolanique au sein de la matrice cimentaire, la perméabilité des bétons de cendres volantes est très nettement diminuée et est inférieure à celle des bétons témoins. Ramezani pour [78], a aussi observé une diminution de la perméabilité dans les bétons de cendres volantes.

2.5.1.3 Les laitiers de haut fourneau

Lors de l'élaboration de la fonte dans le haut-fourneau, il y a automatiquement une production de composés gazeux (gaz de haut-fourneau), de liquides (fonte, laitier) et de solides (poussières de gaz). La quantité de chacun des produits varie suivant la nature des produits enfournés (minerais, combustible (coke), fondants (chaux)) et suivant les conditions de fonctionnement du haut-fourneau [79]. Le laitier produit rassemble sous forme liquide les éléments résiduels de la réduction des minerais autres que les poussières de gaz et les gaz. Ces éléments proviennent de la gangue des minerais, des cendres des combustibles, des additions siliceuses, calcaires ou magnésiennes des fondants. Le laitier en fusion, liquide, se sépare par gravité de la fonte et est évacué à la base du haut-fourneau par un trou de coulée. Il est alors refroidi de façon plus ou moins rapide, ce qui lui confère des propriétés différentes [79].

a. Caractéristiques minéralogiques et chimiques

Le laitier vitrifié a des propriétés hydrauliques latentes alors que le ciment cristallisé a des propriétés hydrauliques. La minéralogie du laitier diffère de la minéralogie du ciment Portland. Ce dernier est constitué de phases cristallisées C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF alors que le laitier est une phase vitreuse [80]. La composition chimique du laitier est similaire à celle du ciment Portland [81], il est composé principalement de la chaux (CaO), la silice

(SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95 % à 97 % des constituants du laitier.

La vitrification des laitiers leur confère des propriétés hydrauliques. Pour être réactif, le laitier doit être vitreux : un laitier de haut fourneau granulé doit avoir au minimum deux tiers de sa masse en laitier vitreux mais compte généralement plus de 90% de phase vitreuse. L'hydraulicité du laitier doit être stimulée par un activant basique pour être efficace rapidement (le laitier seul mélangé à l'eau durcit mais la cinétique de développement des résistances mécaniques est très lente), alors que celle du ciment Portland intervient par simple addition d'eau. Cette prise hydraulique, exothermique, se produit de façon très progressive et permet la formation de produits d'hydratation solides qui constituent la prise et le durcissement du laitier et s'accompagne d'un développement progressif des résistances mécaniques [82]. La composition chimique de laitier de haut fourneau varie d'un pays à l'autre, le tableau 2.4 montre l'analyse chimique de quelque pays.

Tableau 2.4: Composition chimiques du laitier à haut fourneau [81]

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO ₂	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al ₂ O ₃	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO ₃ , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO ₂	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na ₂ O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K ₂ O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
Total	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

b. Influence sur les caractéristiques des bétons frais

Park et al. [66], ont observé une diminution de la viscosité plastique des pâtes contenant du laitier de hauts fourneaux de surface spécifique élevée (5962 cm²/g) par rapport à celle du ciment (3290 cm²/g). Cela a été expliqué par l'apparition de petites particules sphériques de laitier (taille moyenne 8,07 µm) entre de grosses particules de ciment (taille moyenne

18,07 μm). L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai [75], explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

Adjoudj [65], a remarqué que le mortier témoin contenant du laitier, la linéarité de la courbe de seuil de cisaillement est moins marquée et donne une variation croissante du seuil de cisaillement (Figure 2.16). Pour le mortier non adjuvanté, le seuil de cisaillement augmente de 25, 36 et 62% respectivement pour les mortiers contenant 10, 20 et 30% de laitier. Lorsque le laitier est combiné avec de superplastifiant, la valeur mesurée du seuil de cisaillement diminue proportionnellement avec la présence de chaque superplastifiant.

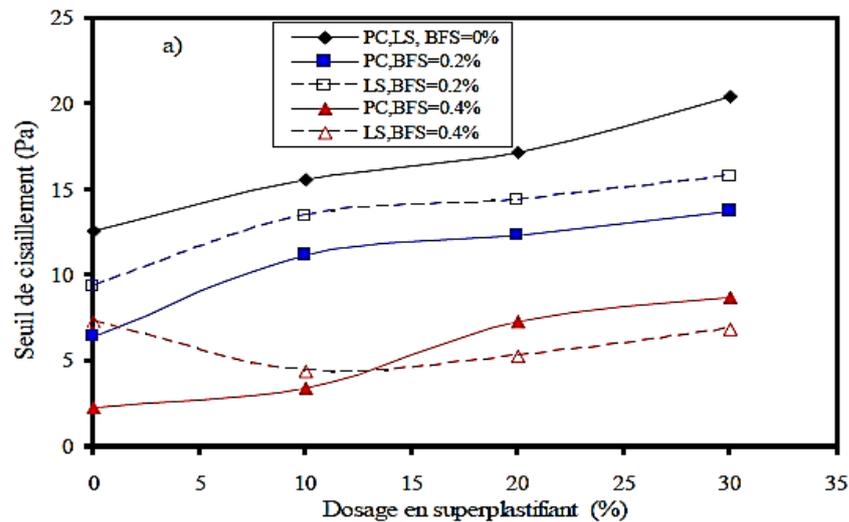


Figure 2.16: Variation du seuil de cisaillement des mortiers au laitier pour différents types et dosages en superplastifiants [65].

c. Influence sur les caractéristiques des bétons durcis

En général, la résistance du béton contenant du LGHF se développe plus lentement, est plus faible initialement et égale ou supérieure à long terme à celle du béton de ciment Portland de résistance à la compression à 28 jours semblable[68].

Certains chercheurs [83], ont trouvé qu'après 90 jours de cure humide, la présence du laitier a conduit à une réduction de la perméabilité des ions chlores, que ce soit en termes de diffusion ou de conduction. Cet effet est plus appréciable pour un taux de 50% de laitier. Amrane et Kenai [84], ont observé que les perméabilités à 60 jours des bétons aux

laitiers et du béton témoin sont très comparables. Le laitier Algérien a une faible réactivité mais il aura le temps de remplir les pores et réduit leur perméabilité.

Yahiaoui et al [85], ont constaté que l'augmentation de la substitution de laitier par le ciment de 15 à 25% a conduit à une résistance à la compression à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quel que soit la durée de cure. Ceci est dû à l'effet pouzzolanique du laitier qui se développe moins rapidement aux jeunes âges. Ils expliquent que la résistance à long terme (90 jours) augmente avec la durée de cure humide initiale, mais cette augmentation est d'autant plus marquée que la substitution de laitier par le ciment est plus élevée. Ceci est dû à l'hydratation du laitier qui s'effectue à long terme lentement mais régulièrement. Une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier a été observée à 90 jours. En effet, à 90 jours, cette augmentation est de 0.70 à 3.12% et 3.19 à 6.82% respectivement pour des taux de substitution de 15% et 25 (Figure 2.17 et 2.18).

Le LGHF semble réduire le fluage en raison de l'augmentation de la résistance finale et du module d'élasticité du béton qu'il entraîne. Toutefois, si une charge est appliquée trop tôt au béton contenant du laitier, le fluage pourrait être plus important que celui du béton de ciment Portland en raison de sa résistance initiale moindre.

L'incorporation de LGHF au béton accroît sa résistance à la pénétration des ions chlorure, à long terme plus particulièrement, et elle favorise la fixation des chlorures. Il s'agit là d'importants avantages en ce qui concerne la protection contre la corrosion de l'armature en acier.

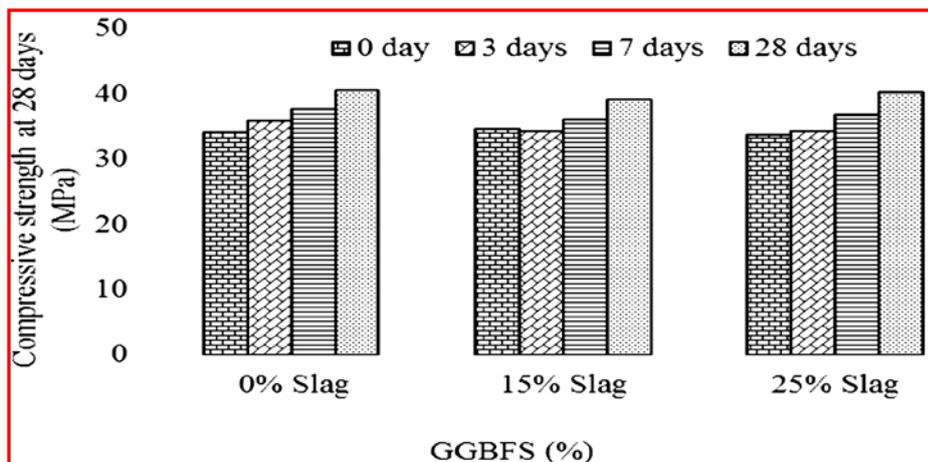


Figure 2.17 : Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 90 Jours des BAP à base de laitier [85].

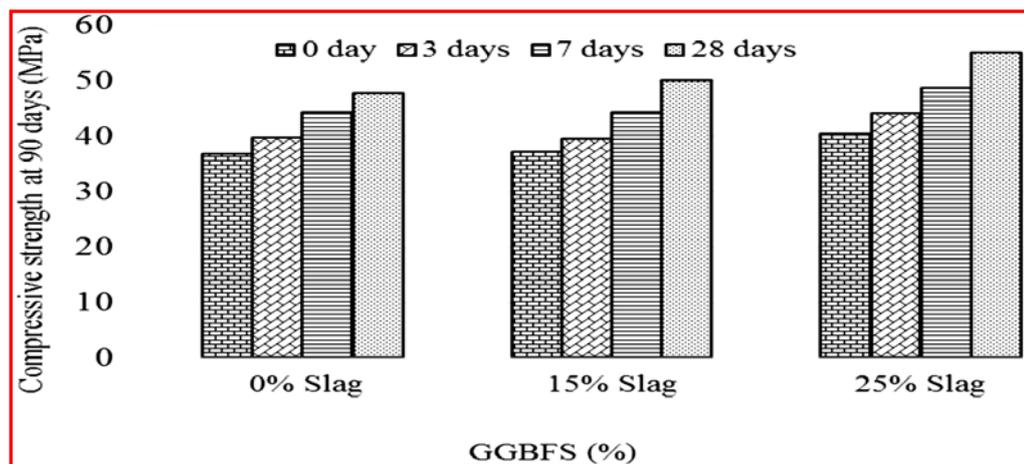


Figure 2.18: Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28 et 90 jours des BAP à base de laitier [85].

2.5.1.4 Les pouzzolanes naturelles

Le nom commun de pouzzolane vient de la ville portuaire de Pouzzoles près de Naples en Italie. Historiquement, il y a plus de 2000 ans avant, les Romains et les Grecs ont utilisé le mélange à base de pouzzolane et de chaux naturelle comme matériaux liant pour de nombreuses structures [81]. Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer [86]. Ces produits ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$ dissous, pour former des composés de silicate de calcium et d'aluminate de calcium développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés par le ciment lors de son hydratation [87].

a. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

La composition chimique des pouzzolanes volcaniques incohérentes varie dans de larges proportions, la silice et l'alumine sont toutefois les constituants majoritaires. Les éléments suivants sont des oxydes de fer, de calcium et des oxydes de magnésium [88]. La teneur en alcalis n'est pas élevée, mais peut varier entre 3 % et 10 %. La perte au feu est

généralement faible, mais peut atteindre à 9 % dans certaines pouzzolanes. L'analyse de certaines pouzzolanes volcaniques est présentée au Tableau 2.5.

Tableau 2.5: Compositions Chimiques(%) de certaines pouzzolanes volcaniques [88]

Pouzzolane	Pays	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	
incohérentes	Bacoli	Italie	53,1	17,9	4,3	9,1	1,2	3,1	7,6	0,65	3,1
	Barile	Italie	44,1	19,2	9,8	12,3	6,7	1,6	1,1	tr	4,4
	Salone	Italie	46,8	18,4	10,3	8,5	4,8	1,0	6,4	tr	3,8
	Vizzini	Italie	50,5	16,8	11,6	4,9	5,2	0,9	0,2	0,15	9,7
	Volvic	France	54,3	16,8				4,5	2,6		
	Terre de Santorin	Grèce	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1				3,5
	Rhine	Allemagne	58,9	19,5	2,9	2,5	1,3	6,1	4,5		2,2
	Rhyolite	USA	65,7	15,9	2,5	3,4	1,3	5,0	1,9		3,4
	Furue shirasu	Japon	69,3	14,6	1,0	2,6		3,0	2,4		1,9
	Higashi Matsuyama	Japon	71,8	11,5	1,1	1,1	0,5	1,5	2,6		6,5

La composition minéralogique de la pouzzolane naturelle varie également aux différentes sources. En raison de leur processus de formation, les pouzzolanes naturelles sont constituées des particules cristallines et non cristallines sous forme de particules vitreuses. Le tableau 2.6 montre la composition minéralogique de certaines pouzzolanes volcaniques.

Tableau 2.6: Compositions minéralogiques de certaines pouzzolanes volcaniques [81]

Pozzolan	Country	Active phases	Inert phases
Bacoli	Italy	Glass	Quartz, feldspars, augite
Barile	Italy	Partially decomposed glass	Pyroxenes, olivine, mica
Salone	Italy	Glass analcime	Analcime
Vizzini	Italy	Glass	Leucite, pyroxenes, alkali, feldspars, mica
Volvic	France	Glass	Feldspars, quartz, diopside
Santorine earth	Greece	Glass	Quartz, anorthite, labradorite
Rhine trass	Germany	Glass (55-60) Glass (62-67)	Quartz (9 %), feldspar (15 %)
Bavaria trass	Germany	Chabasite (3 %) Analcime (5 %)	Quartz (19 %), feldspar (15 %)
Rhyolite pumicite	USA	Glass (80 %)	Clay (5 %), calcite, quartz, quartz (9 %), feldspar, etc. (15 %)
Higashi Matsujama	Japan	Glass (97 %)	Quartz (1 %), anorthite (1 %)
Jajroud trass	Iran	Glass (65 %)	Quartz (22 %), rhyolite, chert, chalcedony

b. Activité pouzzolanique

La réaction pouzzolanique est définie comme la réaction entre les phases actives de la pouzzolane avec de la chaux. La quantité de matière amorphe détermine généralement la réactivité des pouzzolanes naturelles. La réaction pouzzolanique est évaluée par la consommation de la chaux dans un mélange de chaux-pouzzolane ou la mesure de la silice et l'alumine soluble dans l'acide. Il y a plusieurs paramètres influençant cette activité pouzzolanique, La nature des phases actives et leurs proportions, la finesse des pouzzolanes, le rapport chaux/ pouzzolane dans le mélange, la durée et la température de cure [88].

c. Utilisation

La pouzzolane est utilisée dans un grand nombre de domaine variés. Dans la stabilisation des sols pour les routes. En génie civil, les applications sont nombreuses. En plus d'être un composant normalisé des ciments et des bétons, elles présentent toutes les caractéristiques pour être utilisées en tant que granulats pour bétons légers. En Algérie, il y a une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 km entre la frontière Algéro -Marocaine et le Sahel d'Oran. L'utilisation de la pouzzolane se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire, qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés.

d. Influence sur les caractéristiques des bétons frais

Selon Şahmaran et al. [89], la Pouzzolane naturelle a un comportement rhéologique similaire à celui de la fumée silice en raison de l'augmentation des interactions entre les particules fines. Certains chercheurs [90], ont confirmé que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la pouzzolane naturelle, L'augmentation des paramètres rhéologiques du ciment pouzzolanique est due à un système de vides et de canaux présents dans la structure de leurs grains, qui conduisent à l'adsorption de l'eau libre de mélange [89]. Selon Adjoudj [65], l'utilisation de la pouzzolane naturelle, finement broyée, peut améliorer la fluidité du mortier si elle utilisée à des faible taux de substitution. La figure 2.19 montre des valeurs du seuil de cisaillement inférieures à celle d'un mortier témoin lorsque la pouzzolane est utilisée avec différent types et dosages en super-plastifiants. Les mortiers, comportant des additions de pouzzolane naturelle, possèdent une

viscosité plastique accrue avec le taux de substitution. Lorsque cette addition possède une grande finesse et par suite une grande demande en eau, ce qui influe négativement sur la valeur de la viscosité.

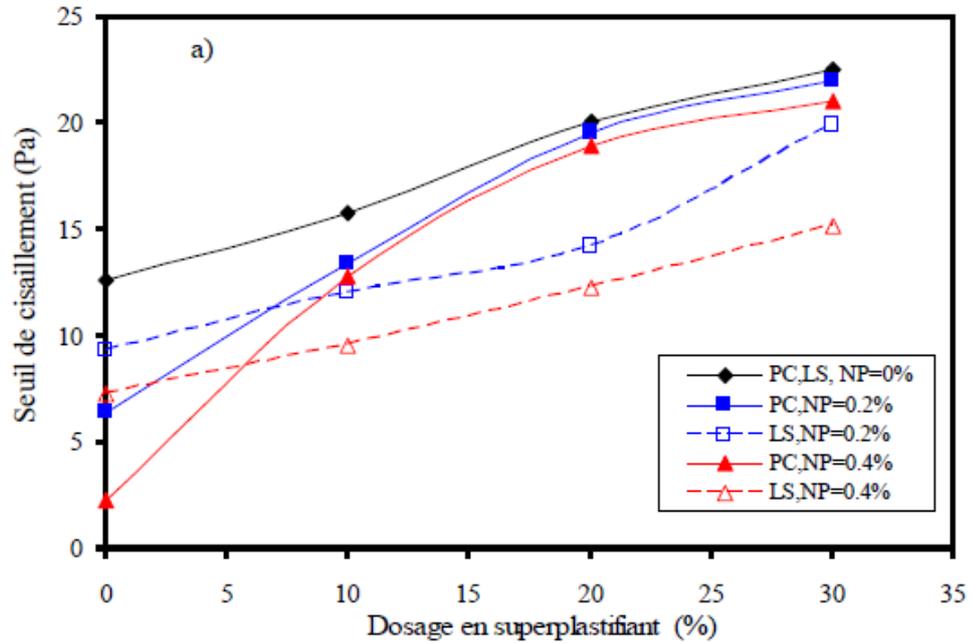


Figure 2.19: Variation du seuil de cisaillement des mortiers à la pouzzolane naturelle pour différents types et dosages en superplastifiants [65].

e. Influence sur les caractéristiques des bétons durcis

Plusieurs études ont montré que la pouzzolane naturelle du Beni-saf possède des propriétés pouzzolaniques et améliore les propriétés des matériaux cimentaires dans lesquels elle est incorporée. Semcha [91], a rapporté que l'effet pouzzolanique pour les mélanges 20% et 30% de pouzzolane est remarquable à partir de 45 jours. Cela est dû à la réaction pouzzolanique qui ne s'amorce qu'à partir du moment où la chaux est libérée par l'hydratation du ciment.

L'étude faite par Aissa et al. [92], a mis en évidence l'influence de l'ajout cimentaire de la pouzzolane dans le béton qui a montré une assez bonne résistance à la compression par rapport au béton avec ajouts (B-FS, B-LT, B-SC) et le béton sans ajouts. Les courbes de la figure 2.20 montrent l'évolution de la résistance à la compression du béton aux différents âges de durcissement avec les divers ajouts et le béton témoin. On constate que le béton témoin présente la plus basse valeur de la résistance à la compression et que le béton à la fumée de silice possède la plus grande valeur de la résistance à la compression à long

terme, cela est vrai aussi, pour le béton à la pouzzolane et qui prouve que l'activité pouzzolanique joue un rôle important dans l'augmentation des résistances.

Par contre les résultats de Hamdi [93], montrent dans la figure 2.21 que la résistance a tendance à diminuer en augmentant le taux de substitution des fillers calcaires ou de la pouzzolane. Elle a aussi constaté qu'avec le super plastifiant « Superfflow 2000 R » elle a les pourcentages en fillers calcaires et en pouzzolane de 0%, 10%, 20% et 30% ils ont pu obtenir des bétons autoplaçants avec des résistances à la compression supérieures à 25 MPa.

Ayed et al. [94], a rapporté qu'à long terme, le béton auto-plaçant à base de pouzzolane naturelle (BAP PN) développe un retrait endogène plus prononcé et un retrait total moins important que le béton auto-plaçant à base de fines calcaires (BAP FC). Le retrait du BAP FC est du même ordre que celui du BAP à base de pouzzolane naturelle, du moins au jeune âge. A long terme, l'hydratation lente de la pouzzolane induit un retrait plus important en raison d'un volume de CSH progressivement plus important.

D'après Kazi et al. [95], les BAP PZ et les BAP CV présentent une adhérence presque semblable à celle du BOV, malgré que le comportement de BAP à long terme semble être meilleur que celui du BOV. Les BAP contenant la pouzzolane naturelle sont plus économiques et possèdent des performances mécaniques comparables à celles des bétons contenant de la cendre volante et meilleures que celles des bétons contenant des fillers calcaires.

Laoufi et al [96], ont remarqués que l'incorporation de la pouzzolane naturelle d'Algérie est bénéfique pour la durabilité, une résistance aux agressions acides des mortiers contenant 10,20 et 30% de la pouzzolane est remarquée.

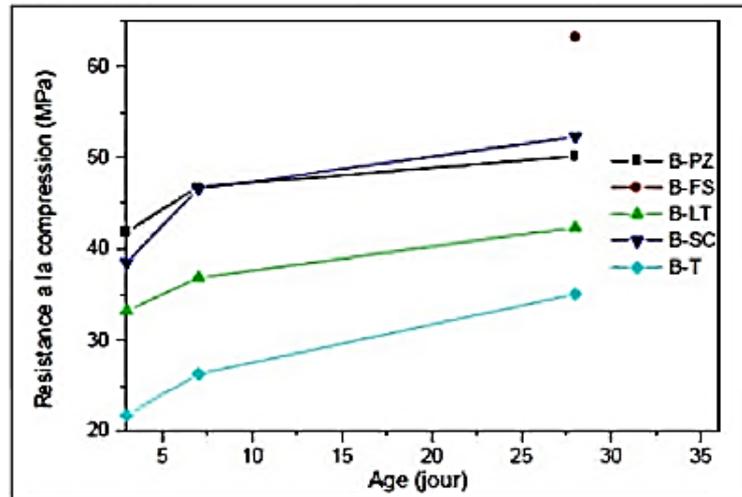


Figure 2.20: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps [92].

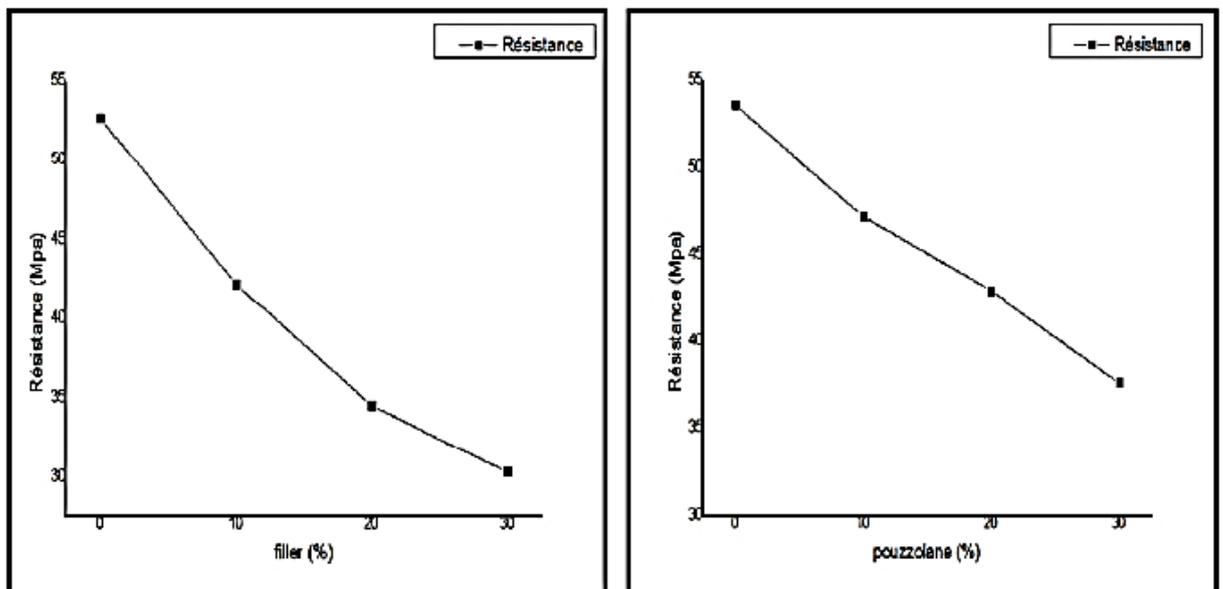


Figure 2.21: La résistance des BAP en fonction du pourcentage de filler et de pouzzolane [93].

2.5.2 Ajouts minéraux inertes

2.5.2.1 Les fillers calcaires

Les fillers utilisés sont très souvent d'origine minérale. Leur principal intérêt est de diminuer le coût global du matériau. Le taux de substitution au ciment peut atteindre 30%. L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des

résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage fin de roches calcaires de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires [97]. Ces additions s'insèrent dans le squelette granulaire du ciment (Figure 2.22), et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci d'après [16].

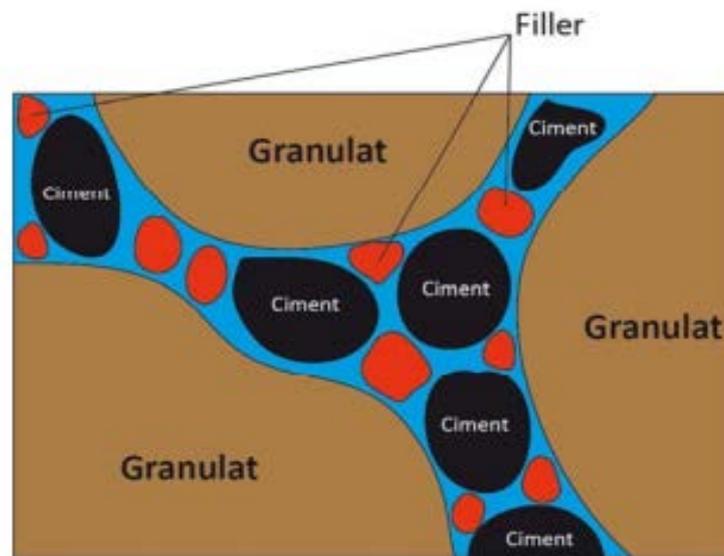


Figure 2.22: Illustration de l'effet filler [16].

a. Composition chimique des fillers calcaires

Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO_3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), s'il réagit de calcaires dolomitique. Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes polymorphiques (calcite, aragonite, vaterite) [54].

b. Influence sur les caractéristiques des mortiers et des bétons frais

Une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité du béton avec l'augmentation de la surface spécifique du filler ont été rapportées (Figure 2.23). Par contre, El Hilali [98],

a remarqué que la finesse des fillers calcaires influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte de ciment. Le même auteur a montré que la viscosité des pâtes autoplaçantes diminue légèrement avec l'augmentation de la finesse des additions calcaires, ce qui implique une réduction du seuil de cisaillement des pâtes de ciments.

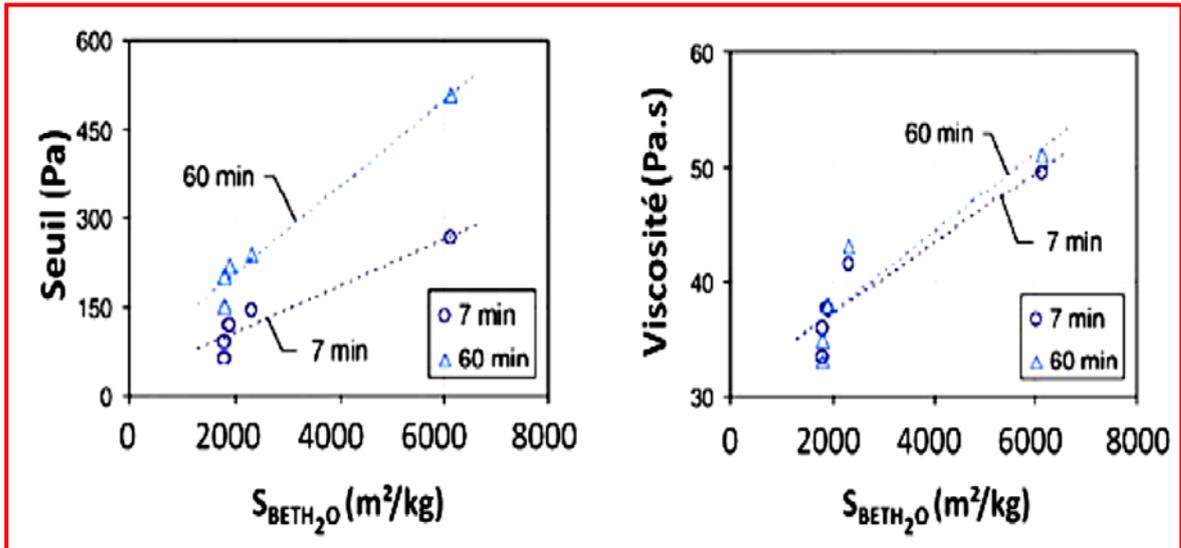


Figure 2.23: Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale [99].

Bonavetti et al. [100], ont montré que l'augmentation du dosage en filler calcaire réduit la capacité de la pâte fraîche au ressuage. Cette réduction est due à la grande surface spécifique du mélange et à la fermeture des pores capillaires par les fillers qui bloquent le mouvement de l'eau dans la pâte.

Tsivilis et al. [101], ont montré que la distribution des tailles des particules en fonction du dosage en calcaire. D'après la figure 2.24, il est clair que le contenu en calcaire est de 24.8 % pour les fractions de taille inférieure à 4µm et celui du clinker est de 75.2 %, d'autre part les particules de taille supérieure à 56 µm ne contiennent que 12% du calcaire.

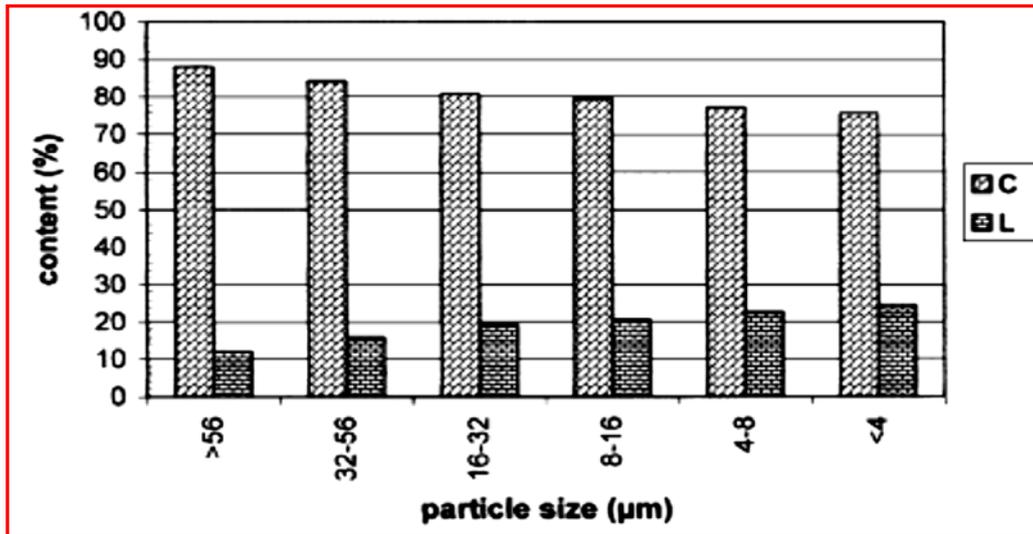


Figure 2.24: Dosage du calcaire (L) et de clincker (C) dans les fractions de différentes tailles après leur broyage (finesse du mélange:3890 cm^2/g , dosage en calcaire 20%) [101].

En présence du calcaire, le mortier devient plus fluide et son seuil de cisaillement diminue linéairement même sans l'ajout de superplastifiant. Lorsque le calcaire est combiné avec le superplastifiant, une légère diminution de son seuil de cisaillement peut être observée (Figure 2.25). Malgré que le LS engendre une baisse monotone avec son dosage, les valeurs du seuil de cisaillement demeurent supérieures à celle du mortier de référence [65]. Un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités et de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage [102].

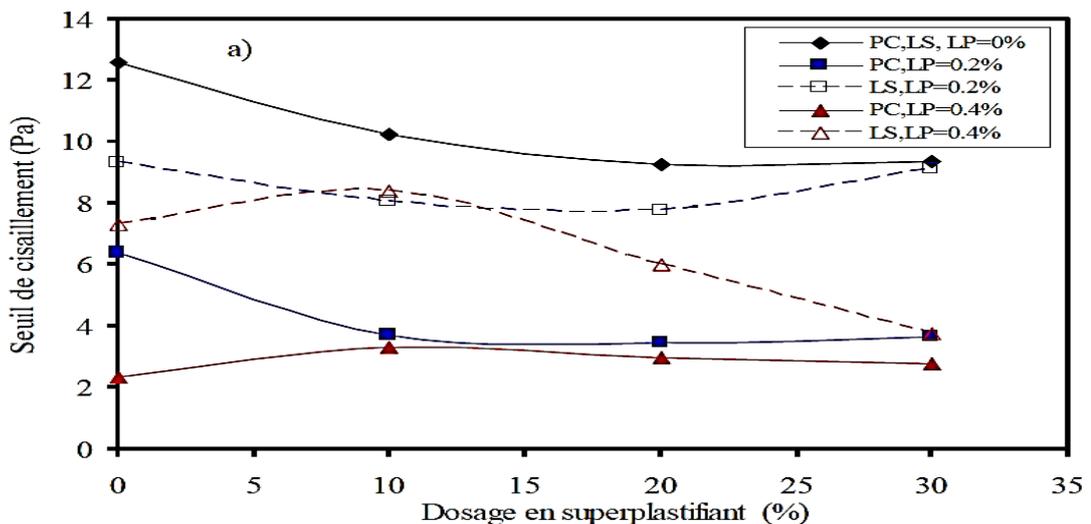


Figure 2.25: Variation du seuil de cisaillement des mortiers au calcaire pour différents types et dosages en superplastifiants [65].

c. Influence des fillers calcaires sur les caractéristiques des mortiers et des bétons durcis

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de monocarboaluminates et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation. Les auteurs rapportent qu'avec le filler calcaire, il y a une augmentation des résistances mécaniques au jeune âge due à l'effet accélérateur et à l'effet filler du calcaire. On note que pour une finesse de 300 à 350 m^2/kg , il y a seulement l'effet filler. La contribution aux gains de résistances apportés par le filler calcaire est dû principalement à la réduction de la demande en eau et une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker. À jeune âge on assiste à une diminution de la porosité initiale. À partir de 28 jours, les chercheurs trouvent des résistances comparables aux bétons témoins.

Benachour [103], a synthétisé respectivement les résultats à 28 jours de la résistance à la compression et à la flexion trois points (Figures 2.26 et 2.27). Les résistances (compression et traction par flexion) sont meilleures qu'avec le mortier de référence pour les taux de fillers allant jusqu'à 35%. L'optimum est à 15% soit 14 MPa d'amélioration de résistance à la compression et de 1.76 MPa (23%) pour la traction par flexion.

La présence du filler calcaire augmente le retrait durant les 24 premières heures. Le retrait augmente aussi avec la finesse du filler, sauf dans le cas d'une granulométrie optimisée. Pour une période supérieure à 24 heures, il n'y pas de différence pour le retrait par séchage. Les auteurs prétendent que l'addition de filler calcaire ne change pas le taux de carbonatation dans le béton.

Au contraire, certains trouvent que pour des résistances mécaniques équivalentes, la profondeur de carbonatation augmente avec l'ajout du filler calcaire. L'addition du filler calcaire diminue la résistance à l'eau de mer puisque le monocarboaluminate n'est pas stable chimiquement. La résistance aux cycles de gel-dégel n'est généralement pas affectée, sauf pour des taux de remplacement supérieurs à 15%. Toutefois, les caractéristiques du réseau des bulles d'air restent les principaux facteurs qui déterminent l'efficacité face aux cycles de gel-dégel [65].

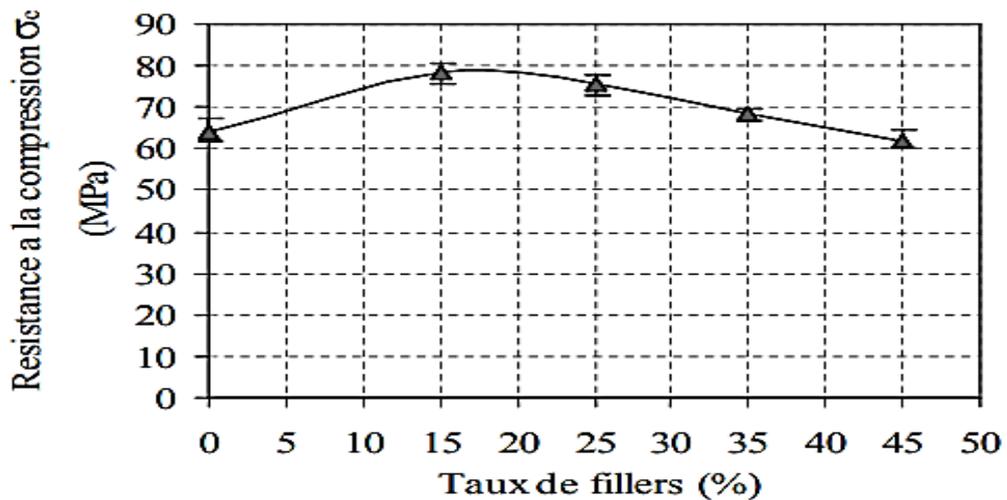


Figure 2.26 : Résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction des taux de fillers [103].

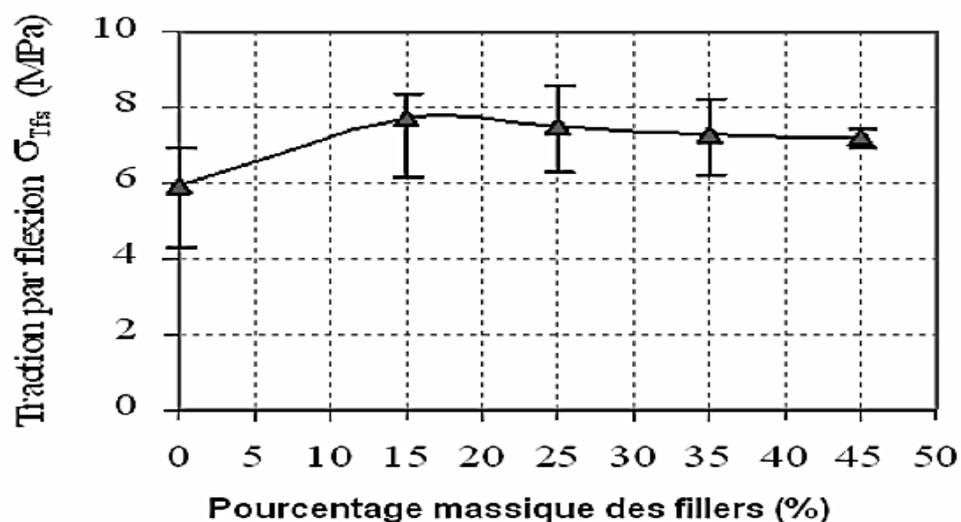


Figure 2.27: Résistance à la flexion 3points des mortiers élaborés en fonction du taux des fillers [103].

La porosité des bétons peut être reliée à la résistance mécanique en compression (Figure 2.28). Assié [27], a rapporté que les bétons avec 35% de filler présentent une porosité plus élevée à même résistance. Par contre, la relation déterminée précédemment avec le ciment CEMI, reliant la porosité et la résistance mécanique n'est plus valable dans le cas du CEM III (Figure 2.29). En effet, à mêmes résistances, les compositions utilisant du CEM III ont des porosités plus importantes que pour le CEM I.

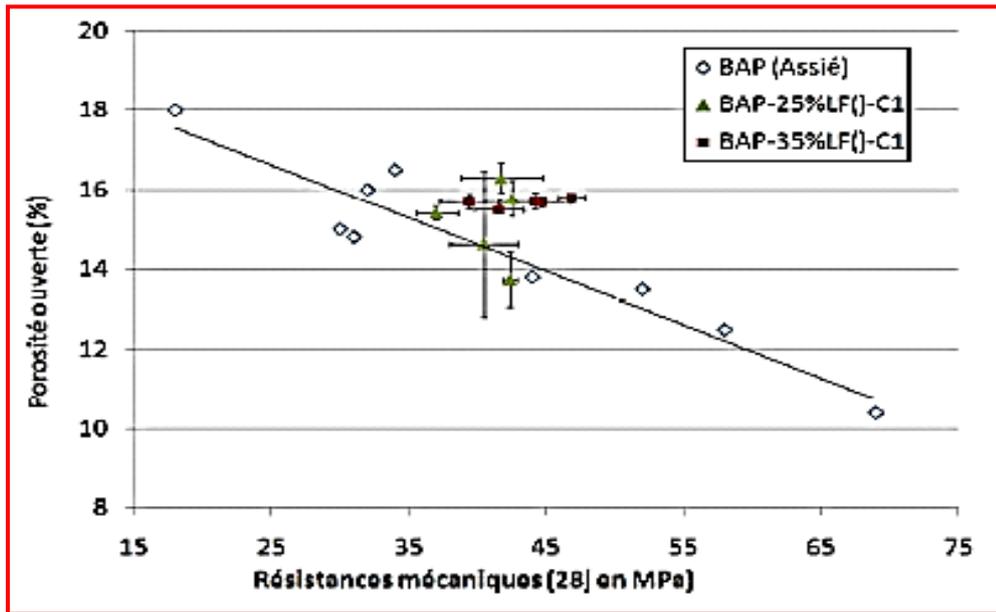


Figure 2.28: Porosité ouverte des bétons en fonction de la résistance pour les BAP 25% et 35% de filler + CEM I [27].

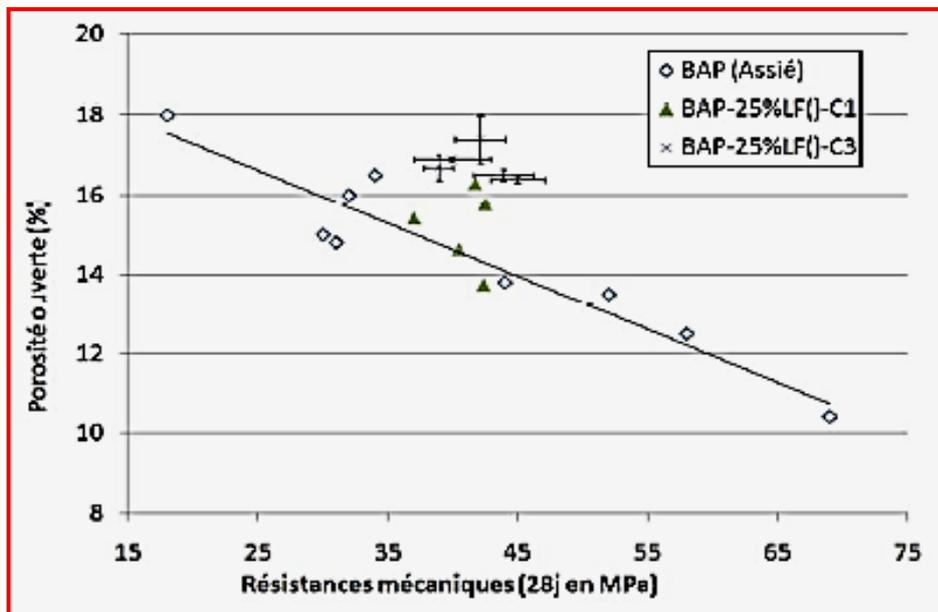


Figure 2.29: Porosité ouverte des bétons en fonction de la résistance pour les BAP 25% filler+ CEM III [27].

2.6 Conclusion

Les ajouts cimentaires sont des matériaux que l'on mélange au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, sont les ajouts cimentaires typiques, et les plus connus dans le monde. Les ajouts cimentaires ont des influences plus ou moins marquées sur les propriétés tant à l'état frais qu'à l'état durci du BAP qui les contient. En plus l'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques et environnemental vue que le remplacement partiel du ciment par des ajouts cimentaires se traduit par une réduction proportionnelle des émissions de gaz à effet de serre (GES).

La synthèse bibliographique a montré que peu d'études de l'effet combiné de température et d'humidité relative (climat chaud) sur la performance du béton à base d'additions minérales notamment la pouzzolane naturelle.

CHAPITRE III:

EFFET DE CLIMAT CHAUD SUR LA PERFORMANCE DES BÉTONS ORDINAIRES ET AUTOPLAÇANTS

CHAPITRE III:EFFET DE CLIMAT CHAUD SUR LA PERFORMANCE DES BETONS ORDINAIRES ET AUTOPLACANTS

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Introduction

En l'Algérie, l'environnement connaît de grandes fluctuations quotidiennes de température et d'humidité ainsi que des vents persistants. La température souvent à 35 °C dans les zones côtières et plus dans le sud qui peut atteindre 50°C durant le mois de mai, juin, juillet et août (les mois les plus chaud de l'année). La température maximale moyenne en été peut s'élever à 45 ° C, tandis que le moyen varie de minimum de 25 à 35 °C. Lorsque cette température ambiante élevée est associée à environ 11 heures de soleil direct, il est compréhensible que la température de surface du béton et le coffrage puisse être beaucoup plus élevé. En outre, une variation de la température ambiante jusqu'à 20 °C en particulier quand il est jeune [104].

La fabrication du béton durant une période de climat chaud peut être affectée. L'ouvrabilité est réduite, la chaleur d'hydratation est plus élevée et la résistance à la compression peut être légèrement affectée.

3.2 Le climat chaud

3.2.1 Définition

D'après le comité 305 de l'American Concrete Institute [105], le temps chaud est défini comme « toute combinaison d'une température élevée de l'air, d'une faible humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à altérer la qualité du béton frais ou durci en accélérant l'évaporation et la vitesse de l'hydratation du ciment ou, sinon, à conduire à des propriétés anormales du matériau ». Pour apporter des précisions à cette définition, on retient trois groupes de climats chauds, en se basant sur les humidités relatives (HR) moyennes des régions concernées [105,106]:

- Climat chaud et humide ($HR \geq 85\%$),
- Climat chaud à humidité modérée ($50\% < HR < 65\%$),
- Climat chaud et sec ($HR < 40\%$).

Le climat le plus sévère pour le béton est le climat désertique ou saharien. Ce climat se trouve dans les zones géographiques des steppes ou aux régions désertiques, rencontrés

dans des régions de l'Afrique, de l'Amérique du Nord, du Sud de l'Australie et du Moyen-Orient. Ce climat est caractérisé par une saison très chaude et une saison moins chaude. Pendant la saison très chaude, la température de l'air varie entre 43 et 49 °C le jour et entre 24 et 30 °C la nuit. Pendant la saison moins chaude, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 10 et 18 °C la nuit. Le différentiel de température entre le jour et la nuit est important; l'humidité relative est faible (10 à 55 %) et le rayonnement solaire est intense; les vents sont souvent chauds et localisés, porteurs de sable et de poussières; les précipitations sont très faibles (50 à 155 mm/an).

3.2.2 Facteurs climatiques à prendre en compte

a) Température de l'air

Les températures élevées sont le terrain favorable à l'évaporation de l'eau du béton et à sa dessiccation. Elles ont également pour effet d'accélérer la prise et le durcissement. Cet affaiblissement mécanique avec l'évaporation de la température. De plus, d'importantes variations journalières peuvent induire des contraintes thermiques non négligeables, particulièrement nuisibles durant l'amorce du durcissement [107].

b) Humidité relative

L'humidité relative est liée directement aux variations de la température de l'air. L'évaporation est d'autant plus forte que cette humidité est faible. La faible humidité relative par temps chaud et sec est susceptible d'entraîner une perte excessive d'eau du béton frais. En effet, d'importantes variations journalières de l'humidité relative sont à l'origine de cycles condensation-séchage pour les surfaces exposées du béton. Cela a des conséquences sur sa durabilité [107].

c) Vent

Par temps chaud, la température du béton n'est pas la seule cause de l'évaporation de l'eau de gâchage, car le vent a une influence appréciable : plus la vitesse du vent est élevée, plus l'évaporation de l'eau de gâchage est importante [107]. Le vent accroît la quantité d'eau évaporée et accélère les échanges convectifs au niveau de la surface du béton [105,108]. La vitesse d'évaporation de l'eau de gâchage est donc d'autant plus élevée que celle du vent augmente. Par temps chaud, cette évaporation peut atteindre de sérieuses proportions si la vitesse du vent excède 15 km/h. Une augmentation de 300% de la vitesse d'évaporation a

été rapportée pour une augmentation de la vitesse du vent de 8 à 32km/h, tout étant égal par ailleurs [105,109].

d) Rayonnement solaire et précipitations

Ces deux paramètres exercent une forte influence sur la température et l'humidité relative ambiantes. La température de l'air dépend directement du rayonnement solaire en l'absence de nébulosité et de pluie. Dans ce cas, le rayonnement direct va provoquer l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulats et eau). L'ensoleillement induit également l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures disposées à l'intérieur et plus généralement de tous les équipements sur chantier (dispositifs de stockage, pompes à béton, canalisation...). Le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier, est fortement réchauffé. Il en résulte une augmentation de la température du béton frais. Après la mise en place du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces en béton exposées et peut entraîner une fissuration par retrait plastique. Par temps chaud, la nébulosité et la pluie diminuent l'effet du rayonnement solaire puisqu'elles en absorbent une partie. Il s'ensuit la diminution de la température et l'augmentation de l'humidité relative, ce qui a pour effet de limiter l'évaporation. Il faut veiller cependant à prévoir les moyens à mettre en œuvre afin d'éviter le délavage du béton qui serait mis en place lors d'un orage ou lors des précipitations journalières en climat équatorial ou tropical humide [107].

e) Evaporation

La littérature fait ressortir que l'évaporation est le paramètre préoccupant lors du bétonnage par temps chaud et qu'elle est amplifiée sous l'action conjuguée des facteurs décrits précédemment. Elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé [110]. Dans le cas du béton frais, la surface d'eau est créée par le phénomène de ressuage. La figure 3.1 présente un abaque pour évaluer le taux d'évaporation et d'humidité d'une surface de béton recouverte d'eau. Cette évaluation permet d'estimer les risques lors de la combinaison de quatre paramètres dépassant le seuil critique d'évaporation de 1 kg/m².h. Pour certains mélanges contenant des ajouts cimentaires, le taux d'évaporation critique est de 0,25 kg/m².h [111].

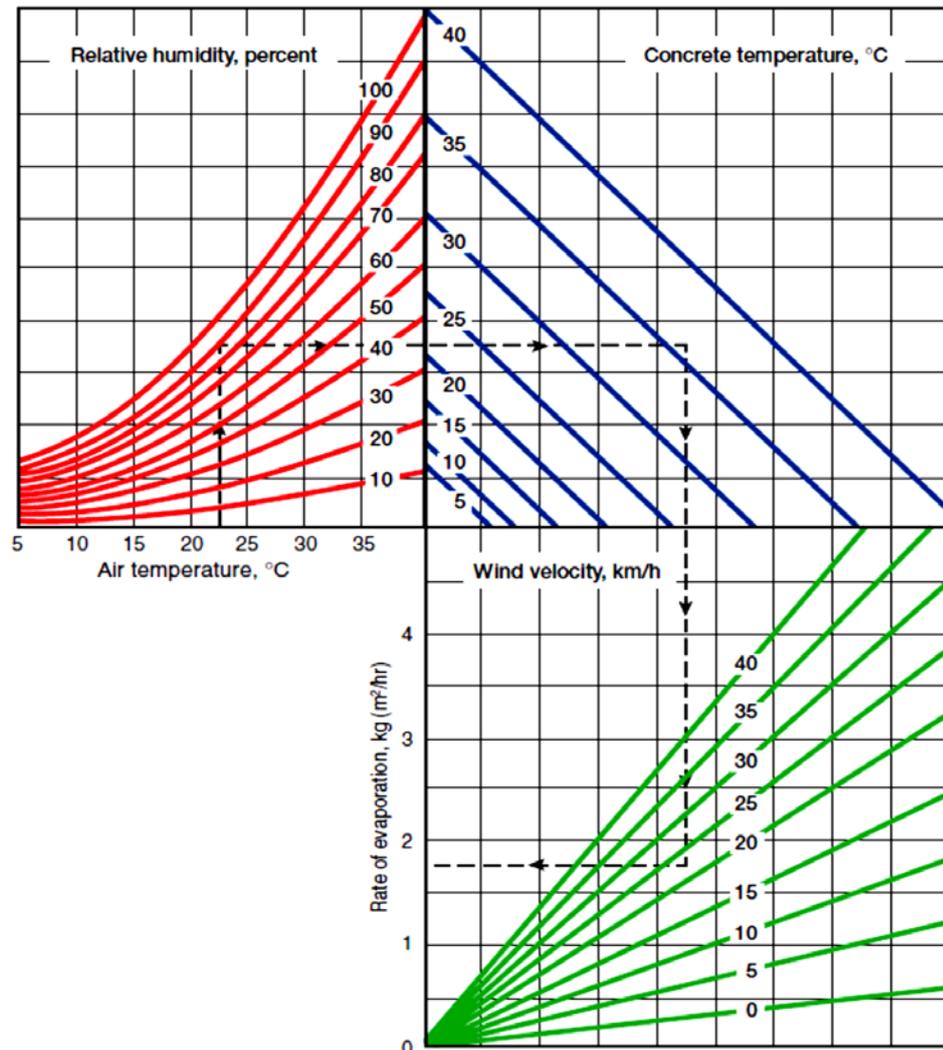


Figure 3.1: Évaluation du taux d'évaporation de l'humidité d'une surface de béton recouverte d'eau [111].

3.3. Effet du climat chaud sur la rhéologie

Le maintien de l'ouvrabilité nécessaire est primordial pour le béton auto-plaçant, la qualité des structures finies réalisées en BAP dépendant quasi entièrement de l'autoplaçance. Selon Al-Abduljabbar [112], les effets de la température initiale (humidité relative maintenue constante, 20% pour toutes les expériences) sur le maintien de l'autoplaçance immédiatement après le malaxage dépendent de la composition. Notamment, un rapport gravillon/sable (G/S) faible provoque l'altération de l'autoplaçante avec l'élévation de la température du mélange (Figure 3.2). De plus, il apparaît en corollaire que, jusqu'à 30 minutes après le malaxage, les propriétés d'écoulement ne sont pas fortement altérées avec l'élévation de la température initiale, notamment pour le mélange à rapport G/S voisin de 1.

Ghafoori et al. [113], ont montré que l'altération de l'étalement immédiatement après le malaxage apparaît au-delà de la température de 28°C pour 3 compositions variant seulement par les dosages en superplastifiant (polycarboxylate) et en agent de viscosité (Figures 3.3 et 3.4). Ils attribuent la perte d'ouvrabilité avec l'élévation de la température initiale à la cinétique accélérée de l'hydratation, l'adsorption plus importante de superplastifiant, la teneur réduite en humidité des granulats et l'évaporation d'eau qu'ils n'ont pas quantifiée. Ils montrent également que les surdosages en superplastifiant et éventuellement en agent de viscosité permettent de retrouver les étalements cibles.

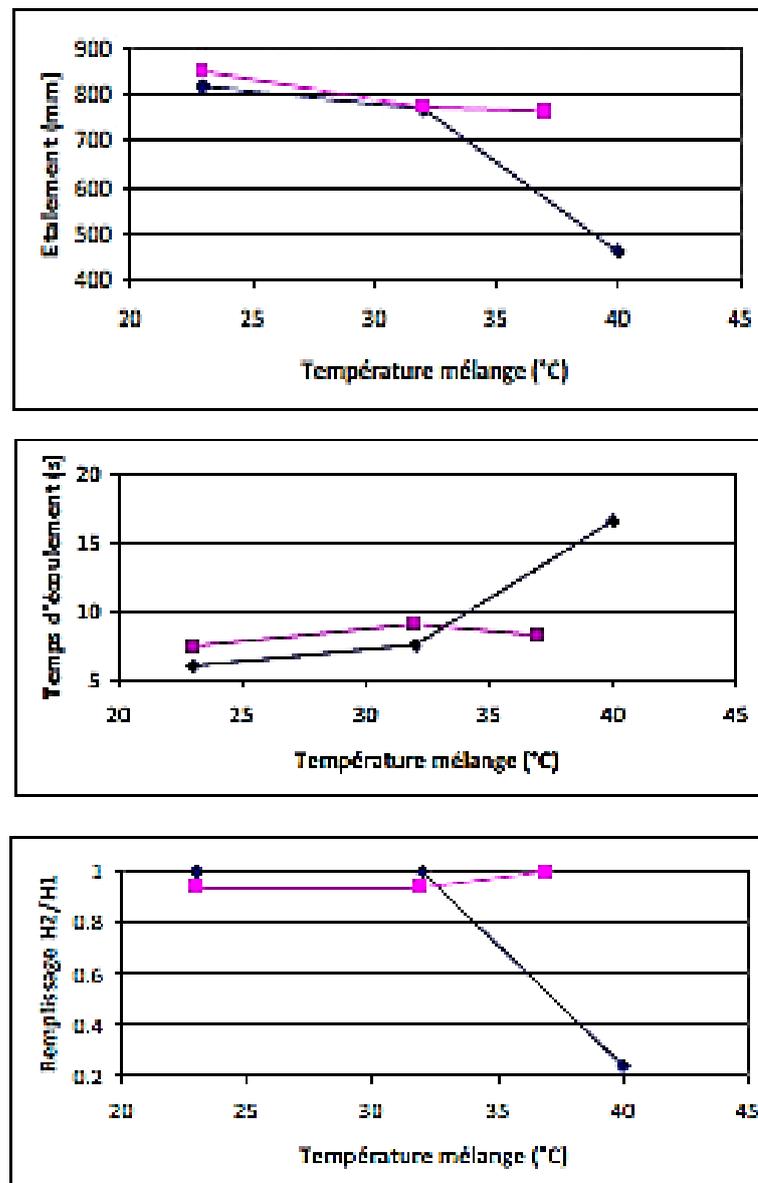


Figure 3.2: Effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale : l'étalement (a), temps d'écoulement à l'entonnoir en V (b) et rapport de remplissage à la boîte en L (c) [112].

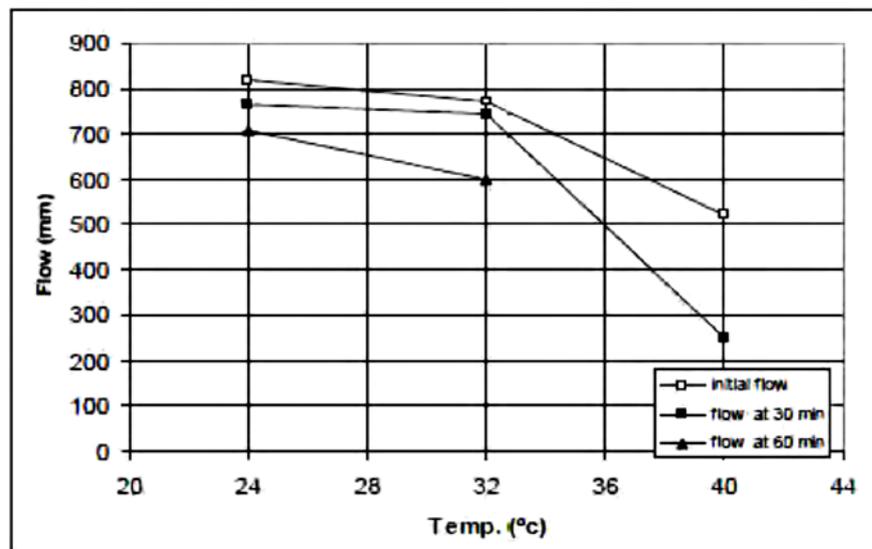


Figure 3.3: Effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes après le malaxage (Mélange A) [113].

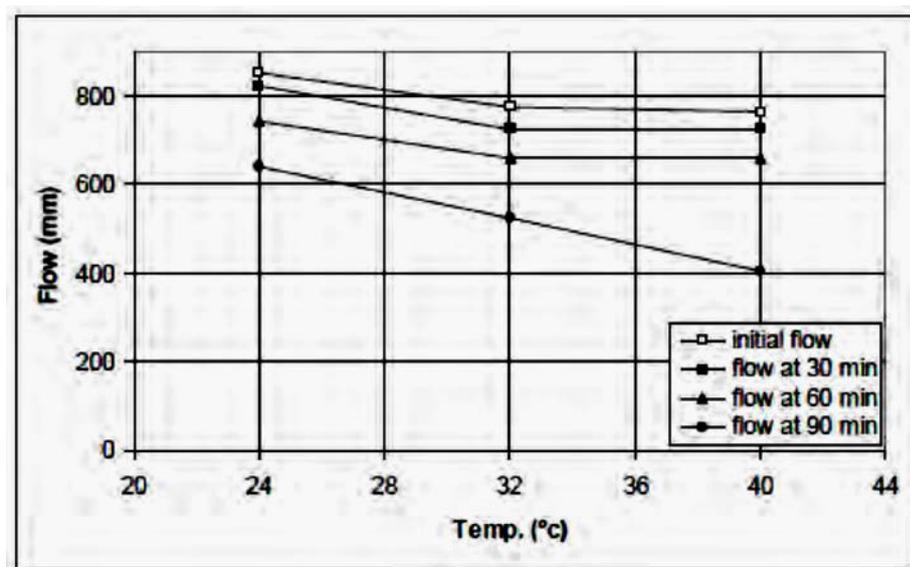


Figure 3.4: Effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes après le malaxage (Mélange B) [113].

Jing [9], a étudié l'effet couplé de l'agitation et de la température sur les propriétés rhéologiques des bétons et des mortiers de béton équivalent (MBE). L'auteur a remarqué que dans le temps et les différentes températures, la variation du seuil de cisaillement du MBE avec le PC1 est très complexe, elle dépend du type d'ajout cimentaire incorporé, du type de MBE et de la température qui influence le dosage en PC1 utilisé (Figures 3.5 et 3.6). Alors que pour le MBE avec le PNS, le PNS% à différentes températures est

quasiment identique, le seuil de cisaillement augmente régulièrement dans le temps. Le seuil de cisaillement augmente plus vite pour le MBE-B avec le PNS à température faible, mais c'est l'inverse pour le MBE-I avec le PNS.

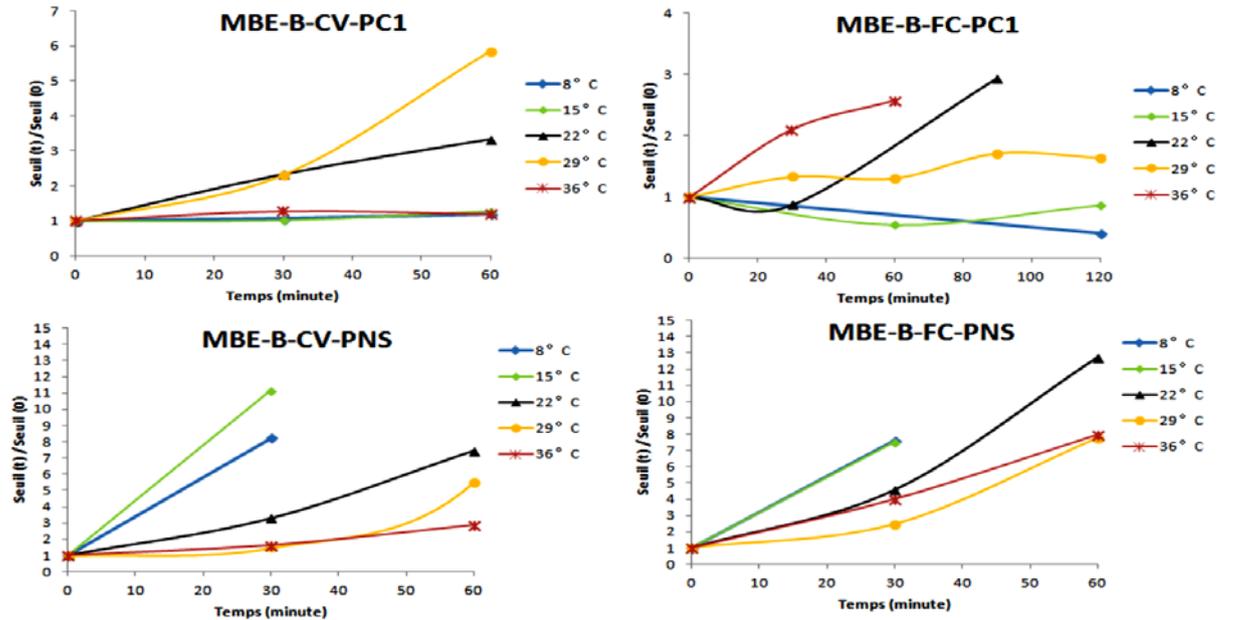


Figure 3.5: Variation du seuil de cisaillement du MBE-B dans le temps à différentes températures [9].

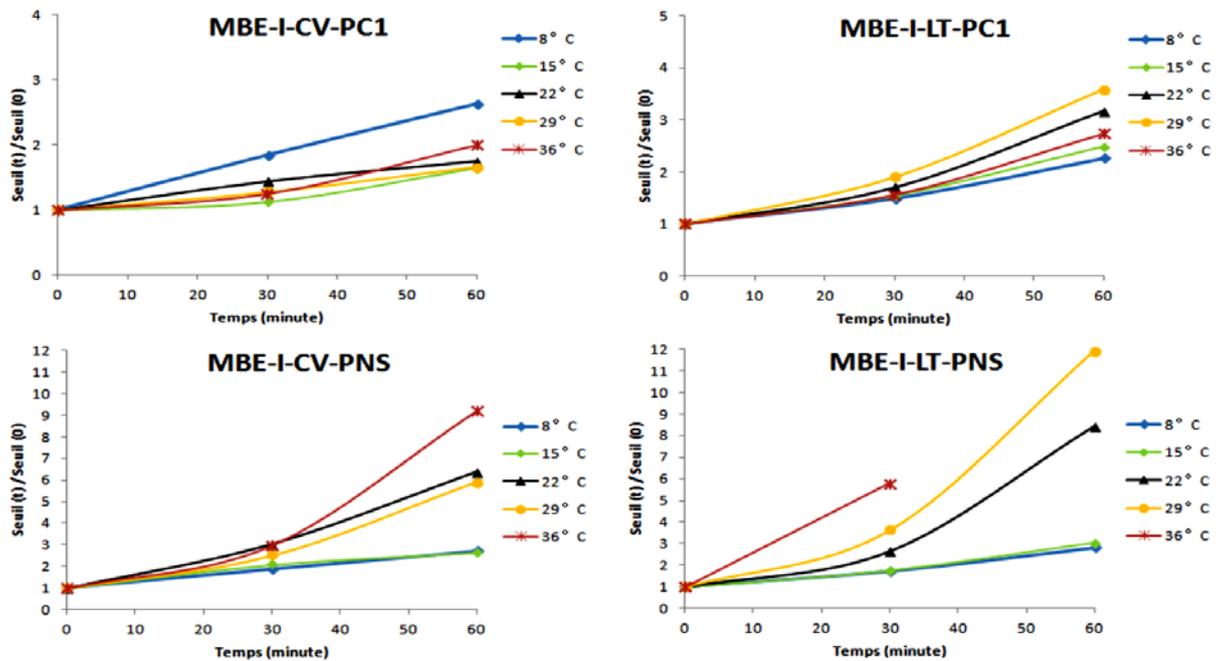


Figure 3.6: Variation du seuil de cisaillement du MBE-I dans le temps à différentes températures [9].

Pour la viscosité plastique, l'effet couplé du temps d'agitation et la température est faible (Figures 3.7 et 3.8). La variation de la viscosité plastique est faible (< 100%)

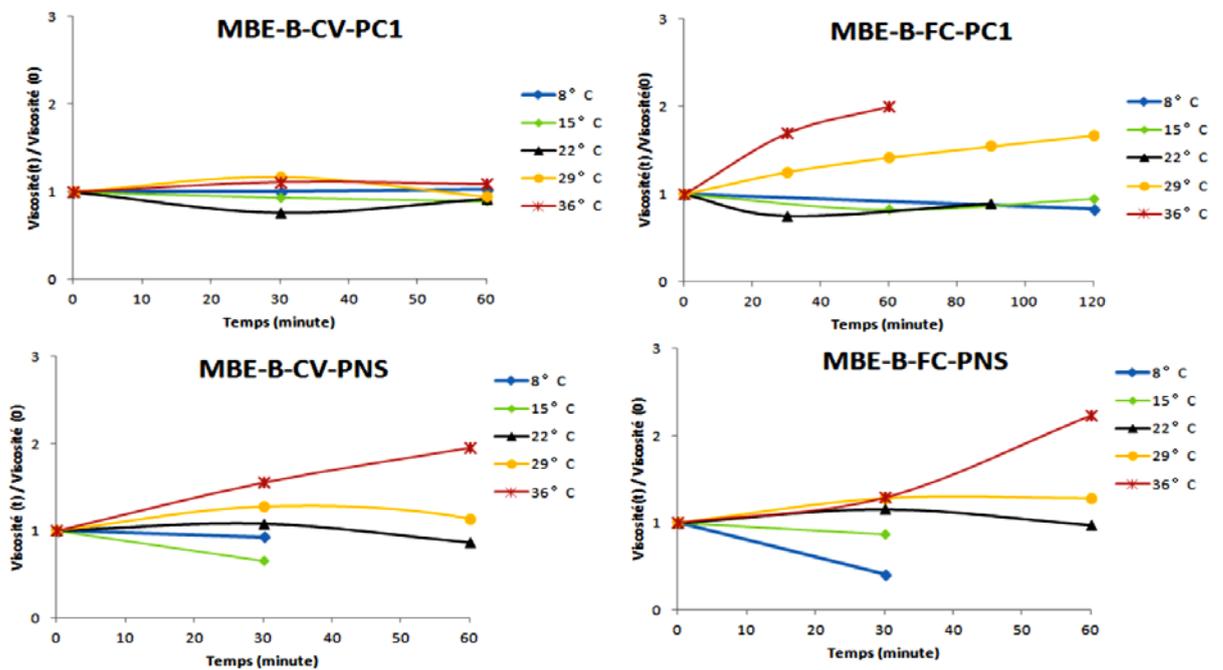


Figure 3.7: Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures [9].

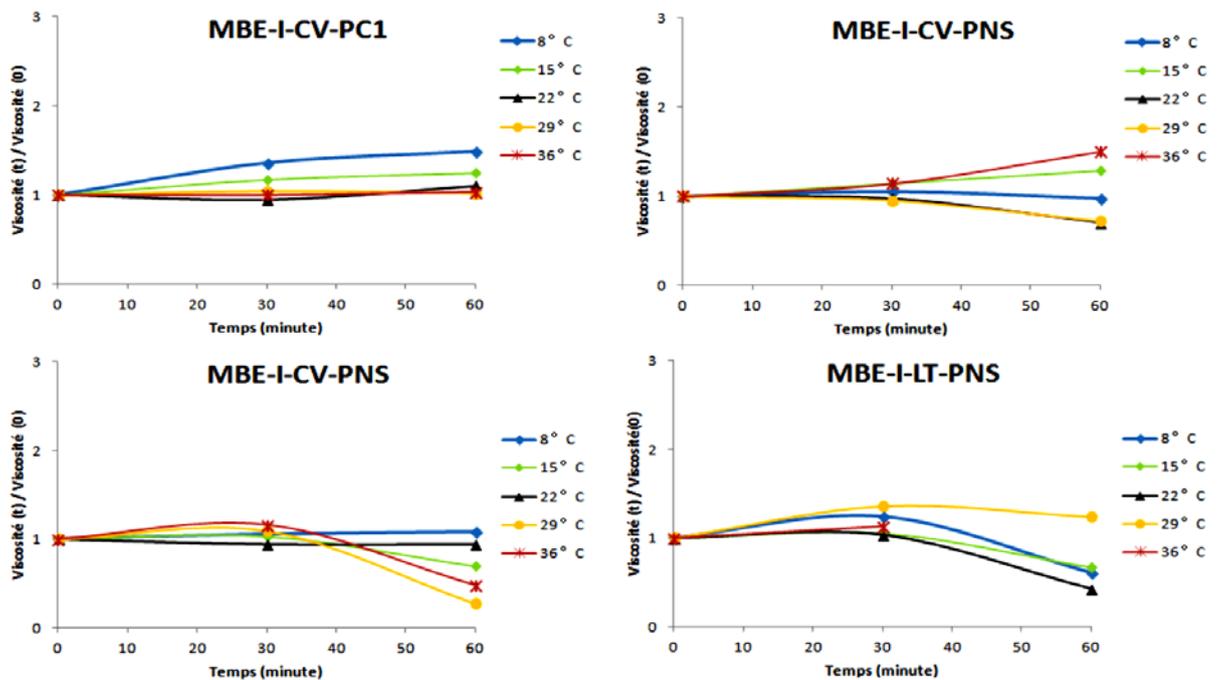


Figure 3.8: Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures [9].

Petit et al. [114], ont trouvé que le taux d'augmentation du seuil de cisaillement est plus élevé à haute température dans le temps (Figure 3.9). Mais avec la normalisation du temps de prise initial du BAP, les valeurs de seuil de cisaillement sont indépendantes de la température. Pour la viscosité du BAP, l'effet de la température est plus compliqué. Ils ont trouvé que la viscosité plastique de BAP à 30°C était plus petite que celle à 20°C dans le temps pour quelques résultats obtenus (Figure 3.10). Avec le temps normalisé, l'effet de la température sur la viscosité plastique est encore très significatif, plus la température augmente, plus la viscosité plastique augmente.

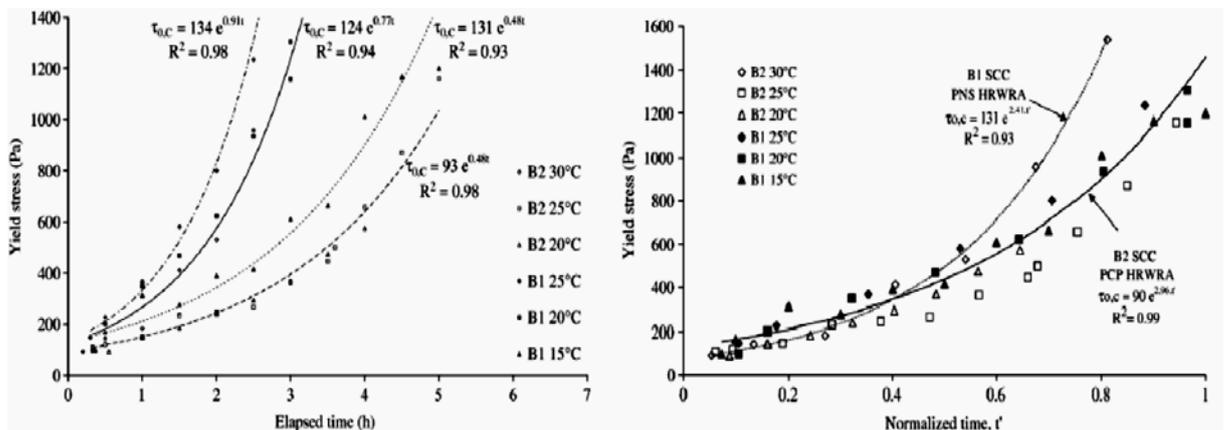


Figure 3.9: Seuil de cisaillement en fonction de la température et du temps[114].

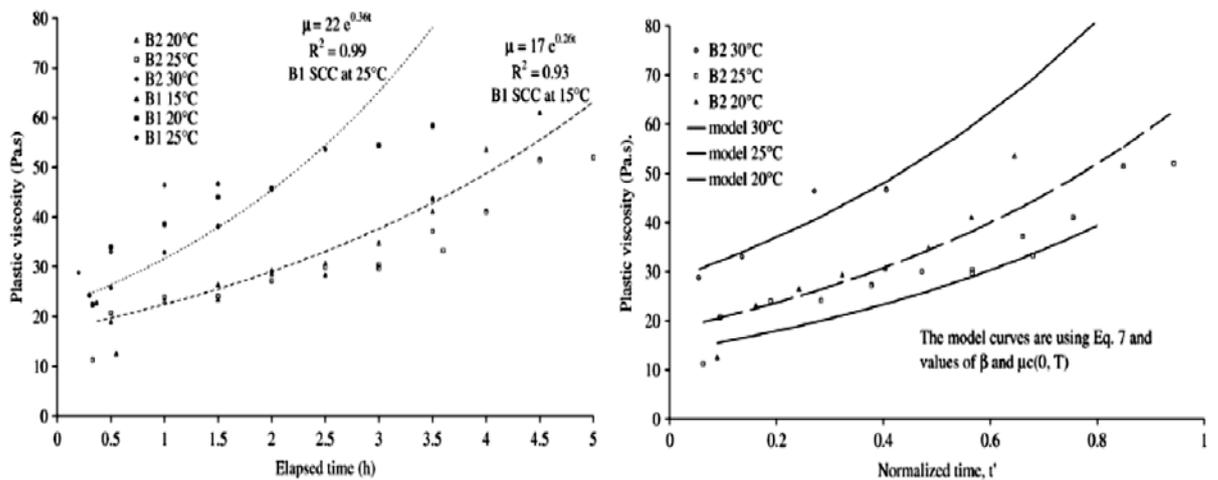


Figure 3.10: Viscosité plastique en fonction de la température et le temps [114].

L'effet de la température sur la viscosité des pâtes de ciment est directement lié à leurs compositions chimiques. Griesser [115], a rapporté que les ciments riches en C_3A se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement (Figure 3.11). D'une façon générale, le seuil de cisaillement augmente avec la température, cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment C riche en C_3A (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. D'après Grisser, le coefficient de viscosité relative a tendance à diminuer avec l'élévation de température et semble relier au type de superplastifiant utilisé (Figure 3.12). La viscosité augmente au cours du temps et autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30° C. Avec l'élévation de la température la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est beaucoup plus marquée en présence d'un superplastifiant [115].

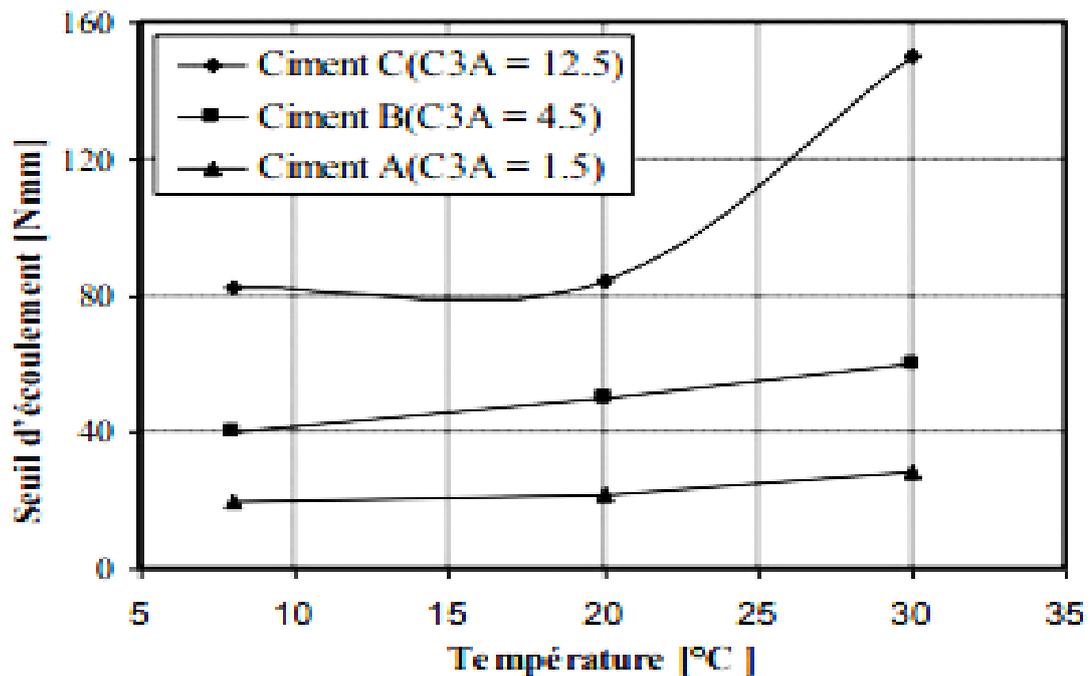


Figure 3.11: Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température Pour différentes pâtes de ciments [115].

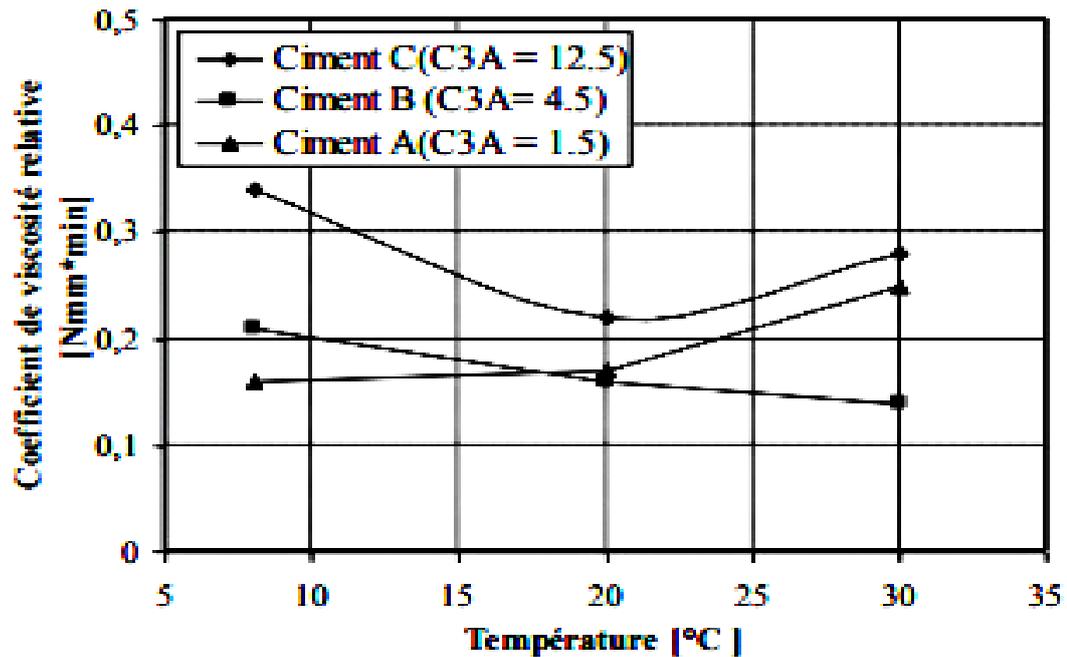


Figure 3.12: Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en superplastifiant [115].

Golaszewski et Szwabowski [116], ont observé une forte influence de l'élévation de la température sur le comportement rhéologique des mortiers accompagné d'une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique. L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en liaison avec son dosage et sa chaleur massique [110]. Par exemple, on retiendra, toute chose égale par ailleurs, que dans le domaine courant :

- Une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C de l'eau élève de 2°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton (Figure 3.13).

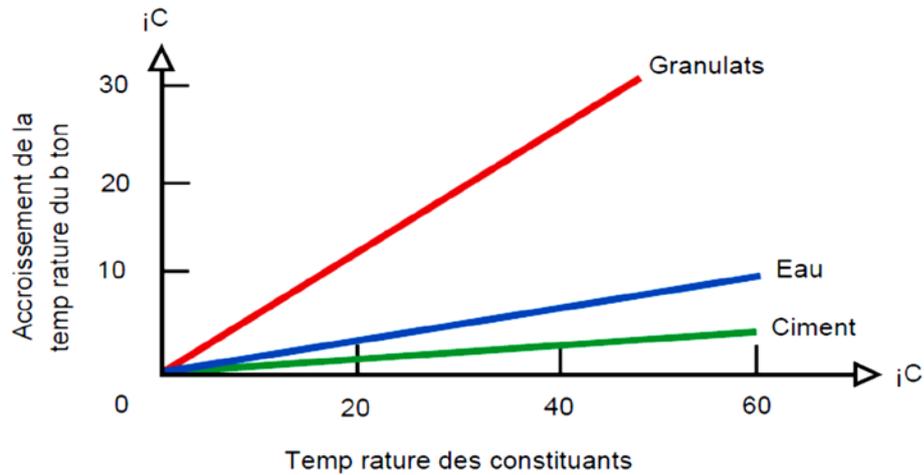


Figure 3.13: Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants [110].

3.4 Effet du climat chaud sur le temps de prise

C'est le temps de cohésion de la pâte de ciment et le passage de l'état moulable à l'état rigide. Lors de ce passage on distingue deux repères : le temps de début de prise et le temps de fin de prise. Ces repères sont déterminés à l'aide de l'essai de Vicat [117]. Par temps chaud, l'élévation de la température du béton a pour effet de diminuer le temps de début et de fin de prise, et donc réduire la période pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre. Donc les réactions chimiques entre le ciment et l'eau sont thermo-activées. Sa vitesse est plus rapide lorsque la température s'élève (Figure 3.14).

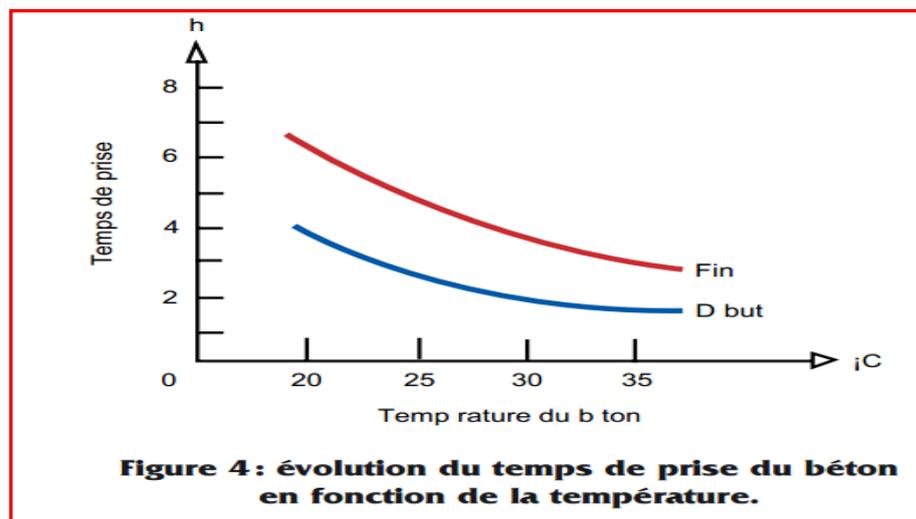


Figure 4: évolution du temps de prise du béton en fonction de la température.

Figure 3.14: Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température [117].

La température la plus favorable pour la réalisation de béton frais de qualité supérieure est généralement inférieure à ce qui peut être obtenu sans refroidissement artificiel [118]. Une température du béton de 10°C à 15°C est souhaitable de maximiser les propriétés bénéfiques du mélange, mais cette température n'est pas toujours pratique. Beaucoup de spécifications exigent seulement que le béton doive avoir une température de 29°C à 32°C lors de la mise en place. Une diminution dans le temps initial de prise du béton lorsque la température augmente a été observé par Ahmadi [119]. Le temps de prise initial du béton augmente avec l'augmentation de l'humidité sur le terrain. L'augmentation de la vitesse d'air sur le terrain, implique une diminution du temps de prise initiale du béton (Fig. 3.15a). L'auteur rapporte des effets similaires de temps de fin de prise à ceux de temps de prise initiale du béton (Figure 3.15b).

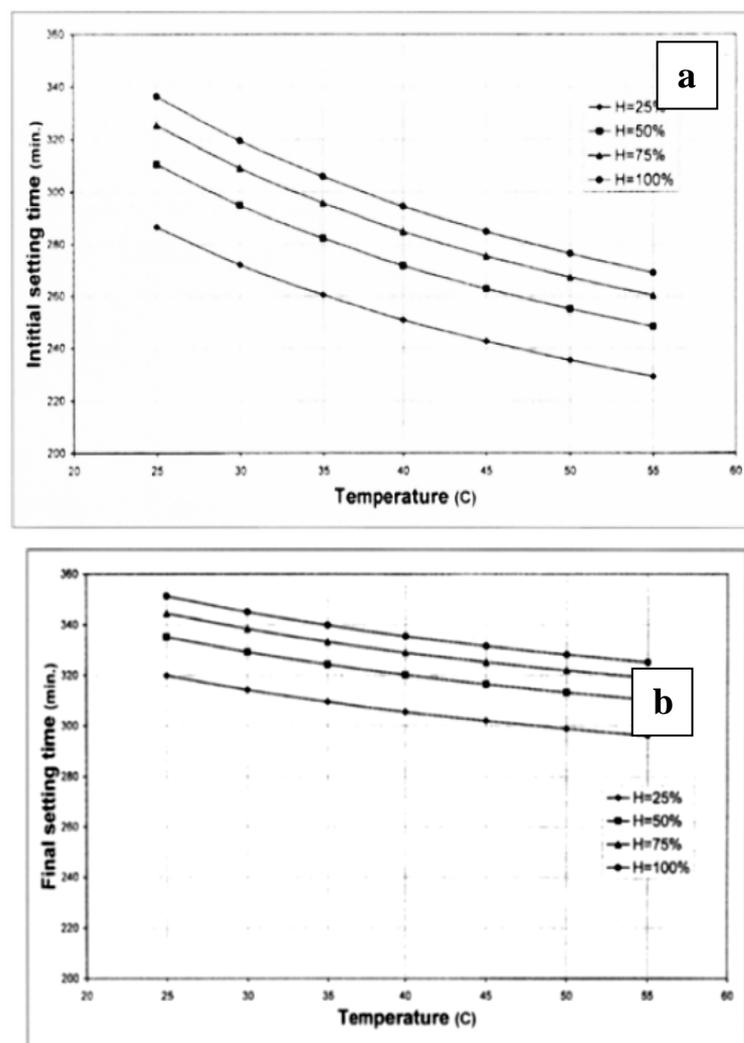


Figure 3.15: Effet de la température sur le temps, a) début de prise ; b) fin de prise [119].

3.5 Effet de climat chaud sur l'efficacité du superplastifiant

Le changement de la température cause une variation d'adsorption de SP, qui doit par conséquence influencer l'efficacité de l'adjuvant et par suite varier les propriétés du béton frais : rhéologie initiale et son évolution dans le temps, thixotropie, rétention de maniabilité, etc. Quand la température est élevée, le seuil et la thixotropie augmente et la viscosité diminue [9].

Les figures 3.16 et 3.17 montrent que l'adsorption du superplastifiant est plus petite à température faible qu'à température élevée [120]. Il y a très peu d'effet de la température sur la concentration de PC libre dans le BAP entre 14 et 36°C, mais cette concentration diminue au-delà de cet intervalle (Figure 3.18). La concentration de PC libre dans le mélange ne représente pas l'adsorption de PC sur les hydrates, mais l'augmentation de cette concentration libre peut conduire à l'augmentation de l'adsorption [113].

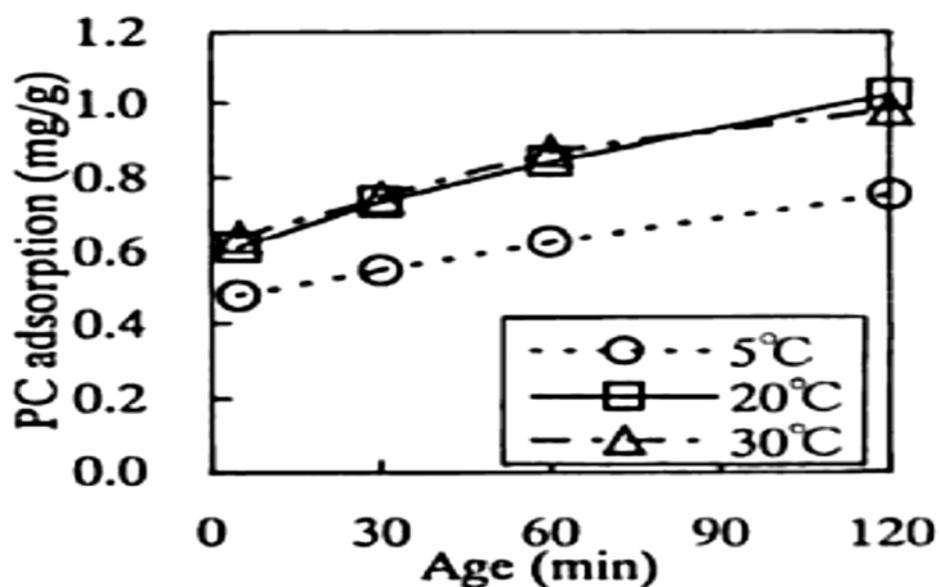


Figure 3.16: Adsorption de PC à différentes températures [120].

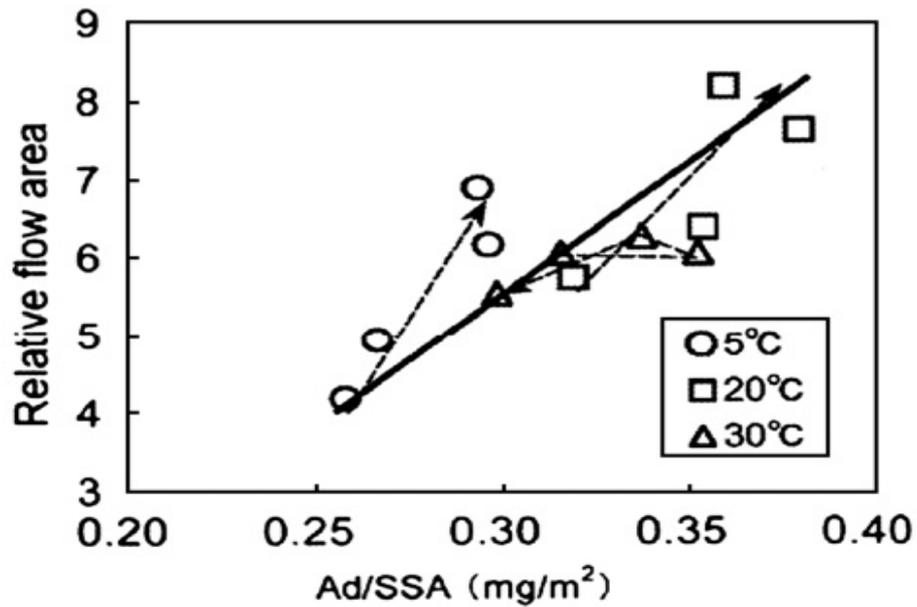


Figure 3.17: Fluidité de pâte et l'adsorption de PC par surface spécifique de grain de ciment à la température de 5, 20 et 30°C [120].

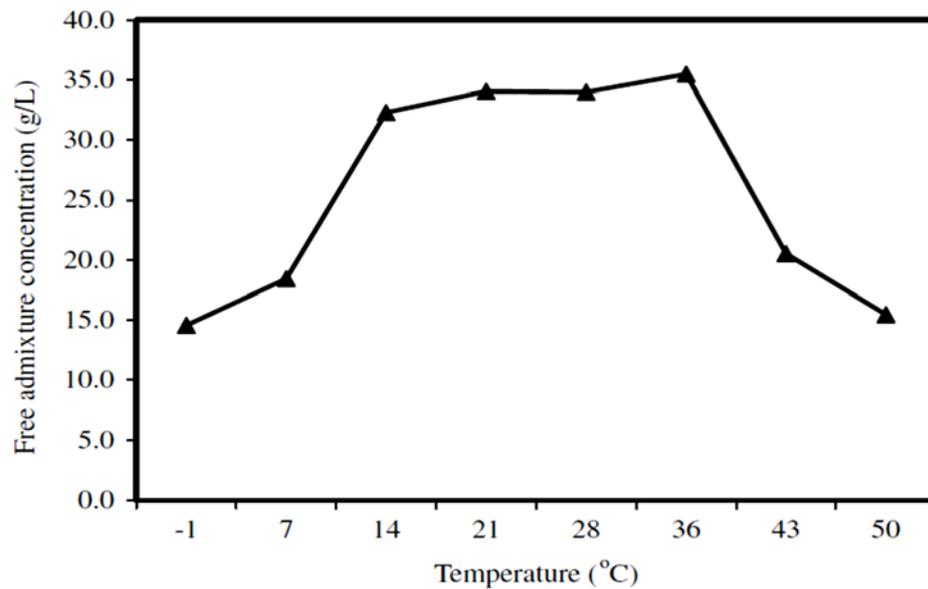


Figure 3.18: Influence de la température sur la concentration en PC libre dans le BAP [113].

Adjoudj et al. [121], ont aussi rapporté un effet néfaste du SP sur la perte de fluidité (Figure 3.19). La différence de la fluidité entre 5 et 60 minutes d'où les valeurs

importantes témoignent de l'inefficacité de ce produit sous des températures élevées et même au-dessus de 25°C.

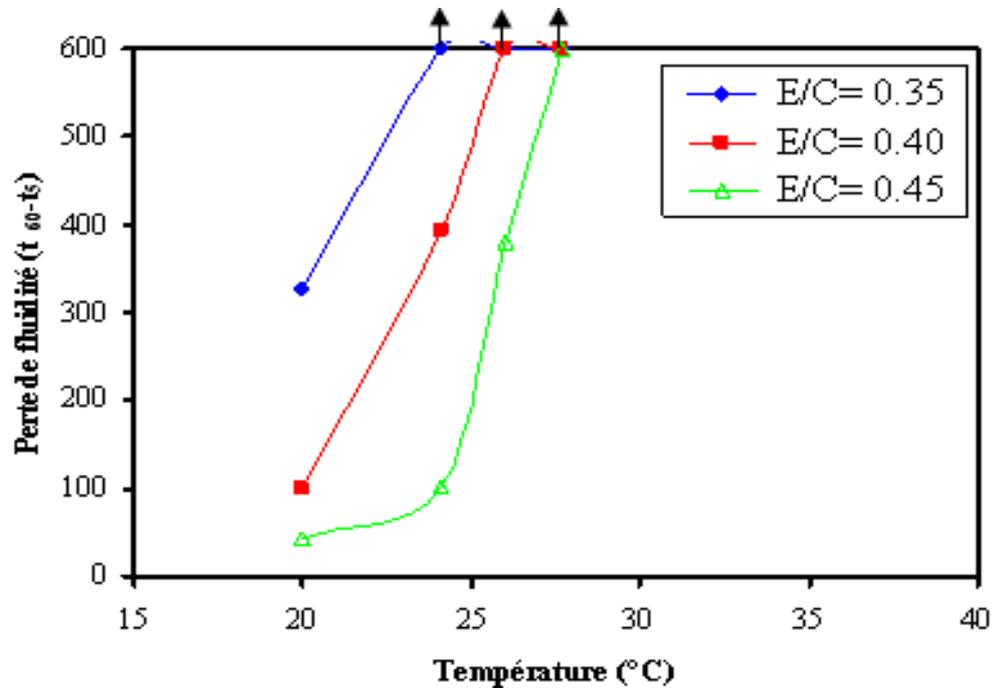


Figure 3.19: Perte de fluidité (t60-t5) en fonction de la température [121].

Adjoudj et al. [122], ont utilisé deux types de ciment (CEM II A/L 42.5) noté CI contenant 10% de calcaire, et un autre ciment composé (CEM II A/P 42.5) noté C2 contenant 15% de pouzzolane naturelle. Les résultats montrent que le superplastifiant à base de naphthalène sulfonate (PNS) présente une bonne fluidité à 5 minutes avec des rapports E/C élevés. A 60 minutes, sa fluidité est complètement détériorée rendant sa compatibilité intermédiaire avec les deux ciments (Figure 3.20). Ce superplastifiant perd sa fluidité avec le ciment à base de calcaire en dépassant le seuil de température de 25°C. Pour un rapport E/C de 0.45, l'effet de l'élévation de température est significatif en présence d'un ciment pouzzolanique où l'adsorption du superplastifiant est favorisée et la fluidité est accrue.

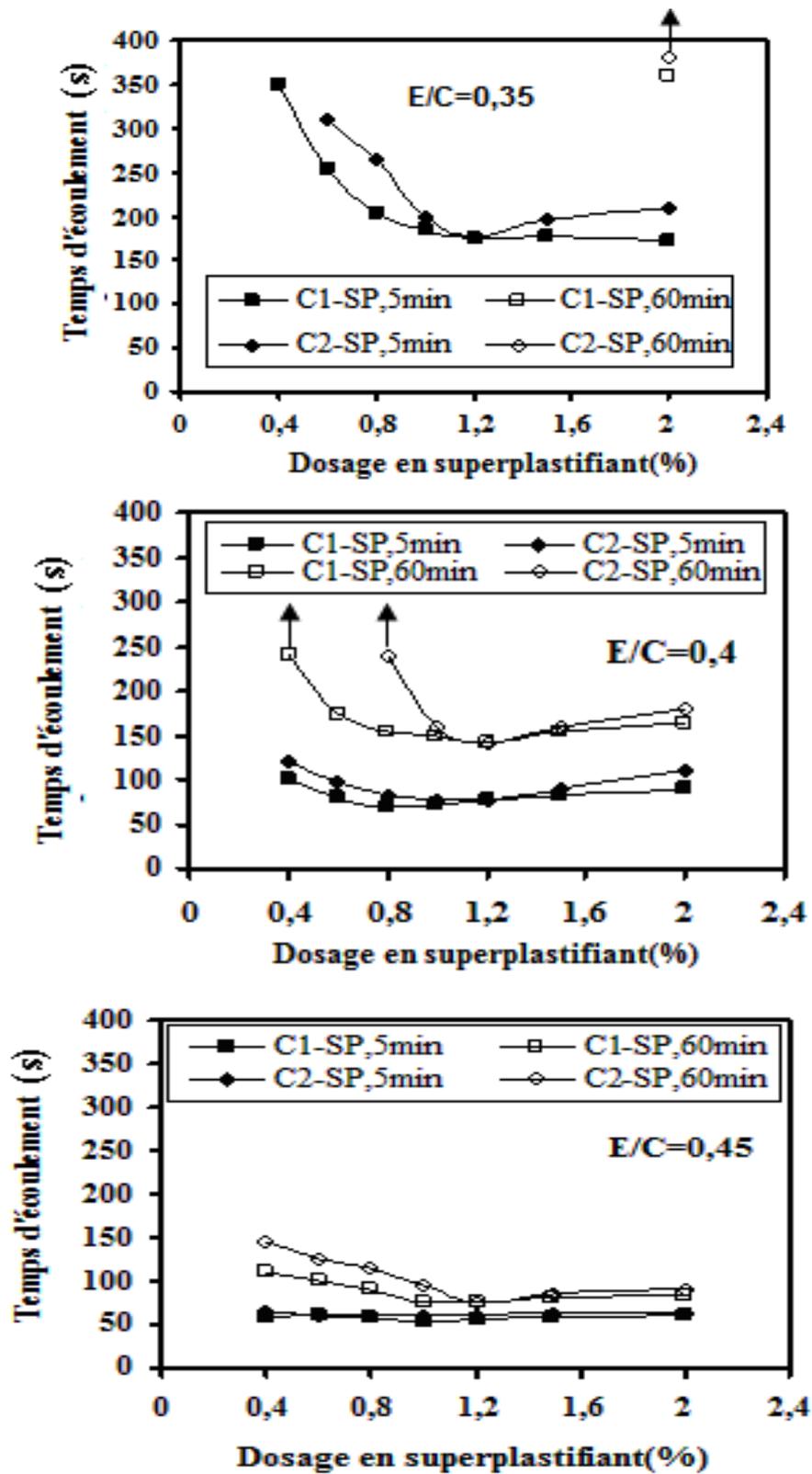


Figure 3.20: Variation du temps d'écoulement à 5 et 60 minutes pour différents dosages en superplastifiant SP et différents rapports E/C (T=20°C) [122].

3.6 Effet du climat chaud sur l'hydratation

La loi d'Arrhenius (équation 3.1) exprime la vitesse d'hydratation qui est liée directement à la température de mélange et à la quantité de chaleur dégagée par le mélange pendant l'hydratation.

$$k = A e^{-E_a/RT} \dots\dots\dots (3.1)$$

Où : k = Coefficient de vitesse de réaction chimique.

A = Constante caractéristique du matériau.

E_a = Energie d'activation apparente (J/mol).

R = Constante des gaz parfaits (J/K.mol).

T = Température absolue du matériau en Kelvin.

Barbarulo [123], a étudié l'effet de la température (de 20°C à 60°C) sur l'hydratation des différents types de ciment Portland, avec différents E/C et différentes finesses de grain de ciment. Il a trouvé que la réaction d'hydratation est toujours plus rapide lorsque la température est plus élevée. La Figure 3.21 montre que l'augmentation de la température accélère la vitesse d'hydratation et la température élevée (jusqu'à 60°C) ne limite pas le degré d'hydratation. Une augmentation de la température engendre une accélération de la cinétique d'hydratation, dont les conséquences sont une accélération de la formation d'ettringite et donc une rigidification de la suspension par accroissement de la concentration en solides (Figure 3.22) [120]. Une élévation de température durant les premiers stades de l'hydratation augmente le développement de la résistance mais a des conséquences néfastes sur les propriétés à long terme [124,125].

Kim et al [125], ont rapporté également que l'emploi d'un liant ternaire (ciment type V avec cendres volantes) maintien ou améliore les résistances à 28 jours entre 23°C et 50°C. La figure 3.23 montre qu'une température élevée induit d'une hydratation plus rapide mais favorise le développement d'un réseau poreux plus grossier [126,127]. Sur le long terme, la résistance des bétons dont la cure a été conduite à basse température est largement supérieure à ceux dont la cure a eu lieu à plus haute température sans pour autant que leur hydratation soit plus élevée. Ceci est dû à un développement microstructural plus grossier, les hydrates (notamment le C-S-H) étant plus denses à haute température et distribués de manière plus hétérogène, permettant ainsi le développement d'un réseau poreux plus large, à l'origine de la perte de résistance.

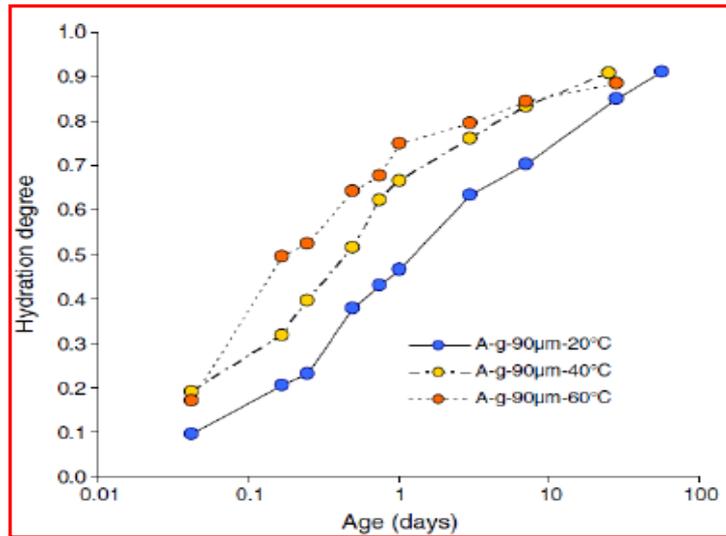


Figure 3.21: Degré d’hydratation en fonction de la température et l’âge du béton [123].

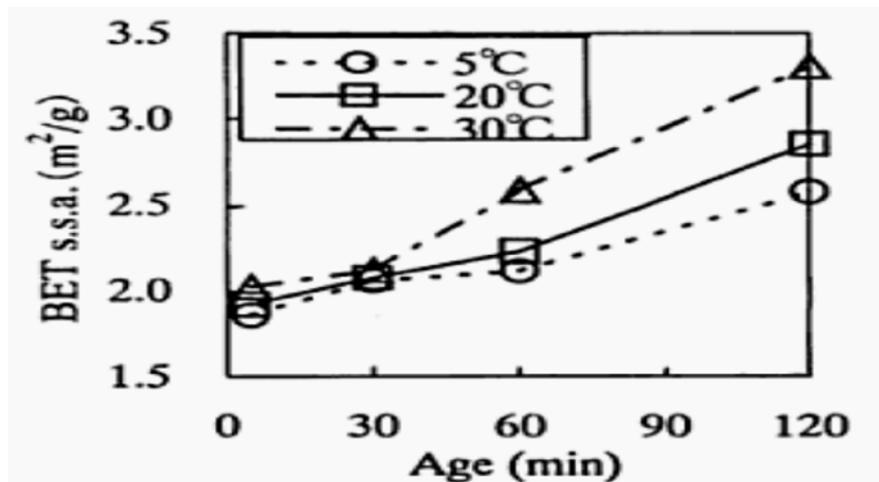


Figure 3.22: Surface spécifique des hydrates en fonction de la température et l’âge du béton [120].

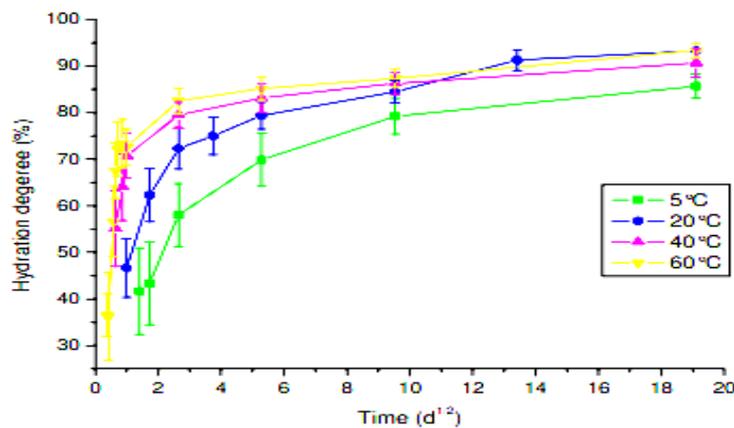


Figure 3.23: Evolution des degrés d’hydratation (mesure par analyse d’image) [126].

3.7 Effet du climat chaud sur la résistance mécanique

Le béton mis en place et mûri dans des conditions de températures élevées développe, à court terme, une forte résistance mécanique. Par contre, le gain de résistance entre 7e et 28e jour s'avère plus faible que celui d'un même béton conservé à de basses températures. Cette forte élévation de la température provoque aux échéances précoces (1ou 2 jour une augmentation de la résistance de béton. Cela se traduit généralement par une résistance de béton à 28 jours moins élevée que celle du même béton qui aurait été conservé à une température plus basse (Figure 3.24) [111].

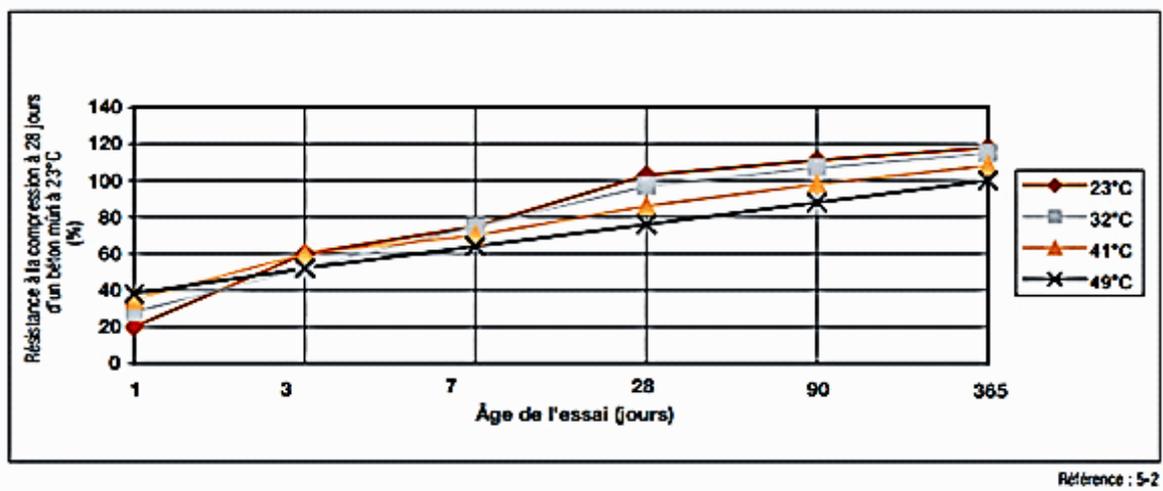
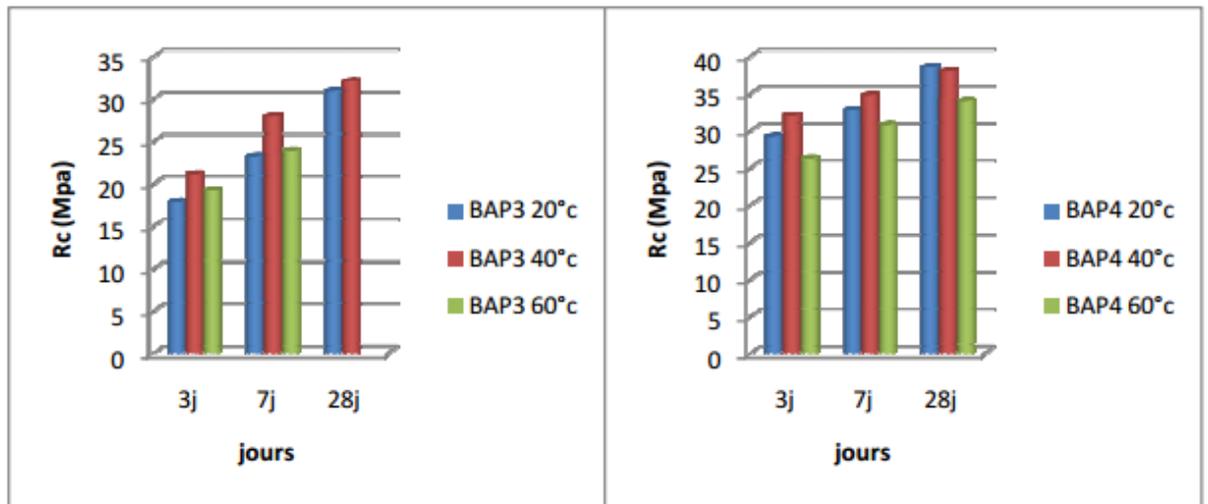


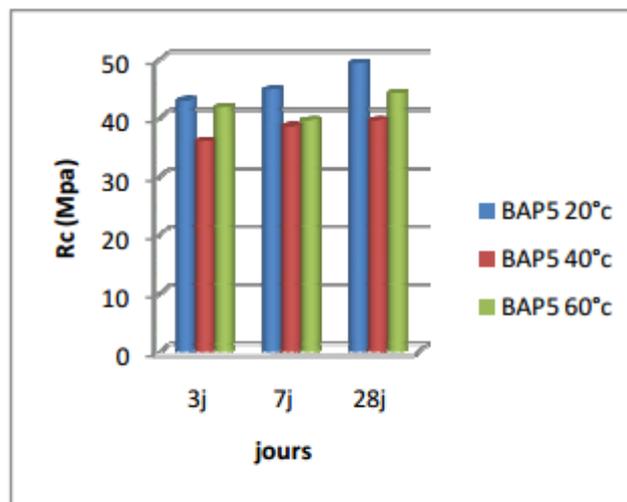
Figure 3.24 : Effet des températures sur la résistance à la compression du béton à différents âges [111].

La température a une influence notable sur le comportement des bétons pour les différents modes de cure adoptés (Figure 3.25). La cinétique de l'hydratation est un phénomène thermoactif. Plus la température est élevée, plus la réaction est rapide. Ainsi, l'augmentation de la température de cure permet d'obtenir des résistances aux jeunes âges plus importantes. Par contre, des températures trop élevées peuvent modifier la structure des hydrates et dégrader les résistances après 7 jours [128].



(a)

(b)



(c)

Figure 3.25: La résistance en compression des BAP (a: BAP3, b : BAP4, c : BAP5) [128].

Gallucci et al. [126], ont testé des éprouvettes conservées dans des conditions isothermes à 5, 20, 40 et 60°C / 100% HR, et les résultats de la résistance à la compression sont résumés dans la figure 3.26. On remarque qu'après trois jours d'hydratation, la résistance du béton à 20°C rattrape celle des bétons à 40 et 60°C. Après 28 jours, elle les dépasse, alors que le développement du béton à 60°C semble s'arrêter. Après un an, la résistance à 5°C rattrape celle à 20°C. La résistance à 60°C est de 25% inférieure.

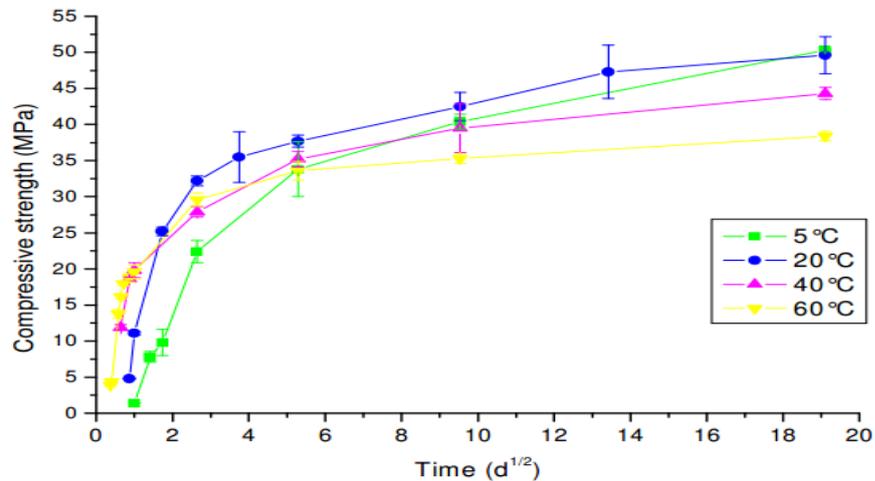


Figure 3.26: Développement de résistance de béton vibré en fonction de la température [126].

Lothenbach et al. [127], ont aussi rapporté des tendances similaires (Figure 3.27). Une température du béton de 38°C durant les 24 premières heures peut faire en sorte que la résistance en compression à 28 jours soit de 10 % à 15 % plus faible que la résistance en compression d'un béton à température normale et suivant un murissement par la norme ASTM C31.

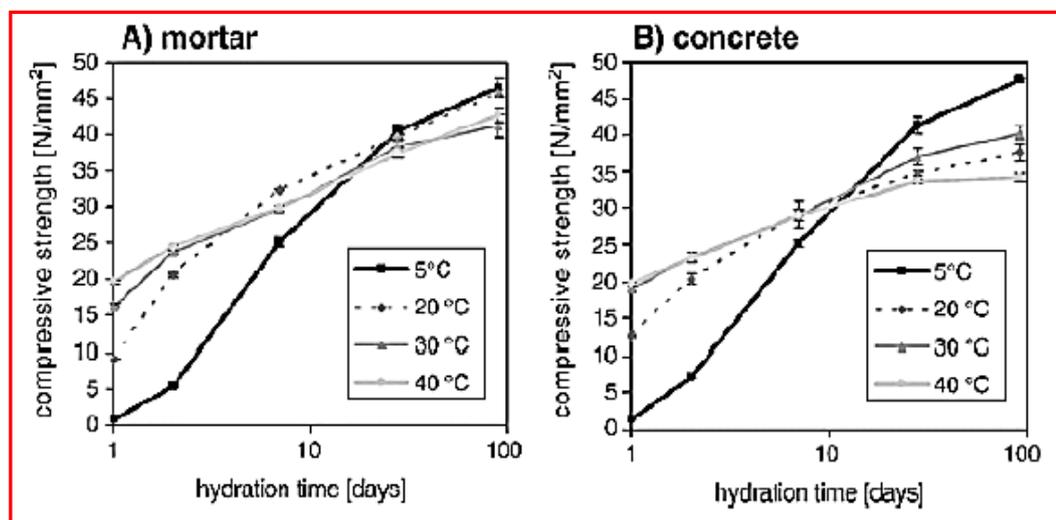


Figure 3.27: Variation de la résistance en compression du mortier (a) et du béton (b) [127].

3.8 Effet de la cure humide sur la performance du béton en climat chaud

Lachmat et Kenai [129], ont montré que la durée de cure a un effet positif sur la résistance à 28 jours. En effet les meilleures résistances approchant la référence ont été obtenues pour la durée maximale de 14 jours de cure, surtout pour l'environnement aride. Un jour et trois

jours de cure n'ont pratiquement pas d'effet sur la résistance dans cette zone. La toile de jute régulièrement mouillée et maintenue pendant 14j a donné des résultats satisfaisants sans pour autant avoisiner la valeur de référence.

Amrane et Kenai [84], ont trouvé qu'en absence de cure humide le développement de la résistance à la compression des bétons aux laitier et du béton témoin en climat chaud s'effectuent d'autant plus rapidement que la température de l'environnement augmente, mais d'une manière irrégulière, sans que les résistances recommandées ne soient atteintes, même à 90j. Dans l'environnement réel, après 7j de cure initiale, les résistances des bétons au laitier n'ont jamais atteint celles du béton témoin, même à 90j. L'effet est dû probablement à une fluctuation de la température et le manque d'humidité dans un tel environnement et aussi à l'insuffisance de la période de cure. La résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais se développe assez bien à long terme pour des taux de substitution n'excédant pas les 30%.

3.9 Effet de climat chaud sur la diffusion des ions du chlore et la porosité

L'évaporation de l'eau par le climat chaud provoque l'augmentation de la porosité. L'eau en partant crée des vides qui seront des espaces libres pour la venue des agents agressifs (chlorures, carbonates, les sulfates, les alcalins, les acides). Cette porosité aurait donc pour conséquence une diminution de la durabilité du béton.

Des mesures par analyse d'image ont été effectuées par Gull [126], pour déterminer la porosité capillaire. Sur le long terme, la cure en température a pour effet de générer un réseau poreux plus large. Gall a distingué deux périodes : à très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée. Ceci est lié aux faibles taux d'hydratation mesurés. Très rapidement, il observe une inversion des tendances avec des porosités plus fortes à haute température. L'évolution est donc similaire à celle observée pour les courbes de résistance en compression et ces deux grandeurs sont donc à mettre en relation (Figure 3.28). Le fait qu'il n'y a pas de relation directe entre le taux d'hydratation et la porosité montre à nouveau clairement l'influence de la microstructure générée en fonction de la température.

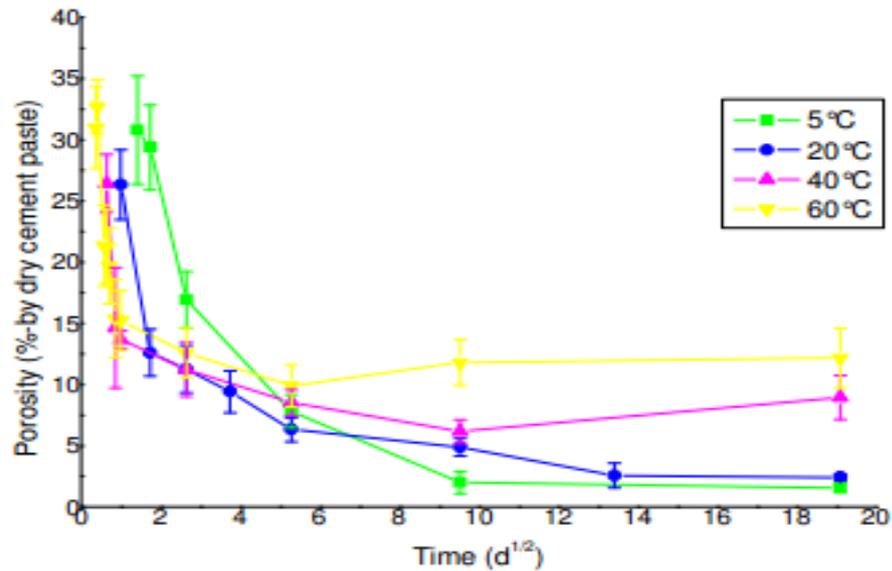


Figure 3.28: Evolution de la porosité (mesure par analyse d'image) [126].

Ramezaniapour et Malhotra [130] ont constaté que les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage montrent la plus mauvaise performance en termes de développement de résistance, de porosité et de résistance à la pénétration des ions du chlore. La cure humide continue du béton est indispensable pour obtenir une résistance élevée, une faible porosité et une résistance plus élevée à la pénétration des ions de chlore. L'auteur a constaté que dans une cure humide, la résistance du béton à la pénétration des ions de chlore est très élevée à un jour pour tous les bétons étudiés, et diminue avec le temps. La forte diminution de la perméabilité du béton est due à la variation de la porosité de la structure hydratée de ciment à base d'ajouts cimentaires (Fig. 3.29). Dans une chambre climatique ($T=38^{\circ}\text{C}$ et $\text{RH}=65\%$), tous les mortiers montrent une porosité totale significativement plus élevée par rapport aux valeurs obtenues pour l'état de cure humide. Les mortiers témoins sont les moins performants, c'est à dire plus de pourcentage cumulé de volume des pores d'environ 35%. Les autres mortiers également ont des mauvais résultats, avec un cumule total de porosité supérieure à 20% (Figure 3.30).

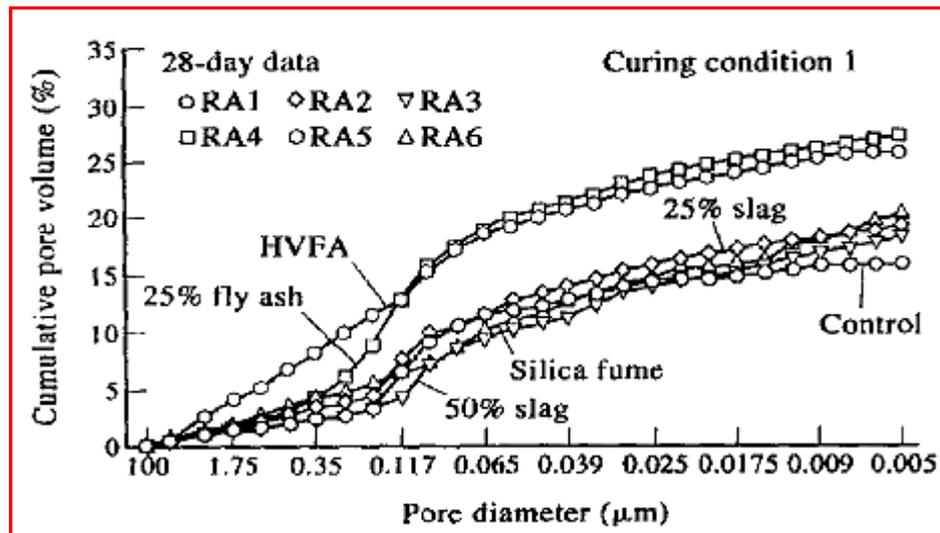


Figure 3.29: Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une cure humide après démoulage [130].

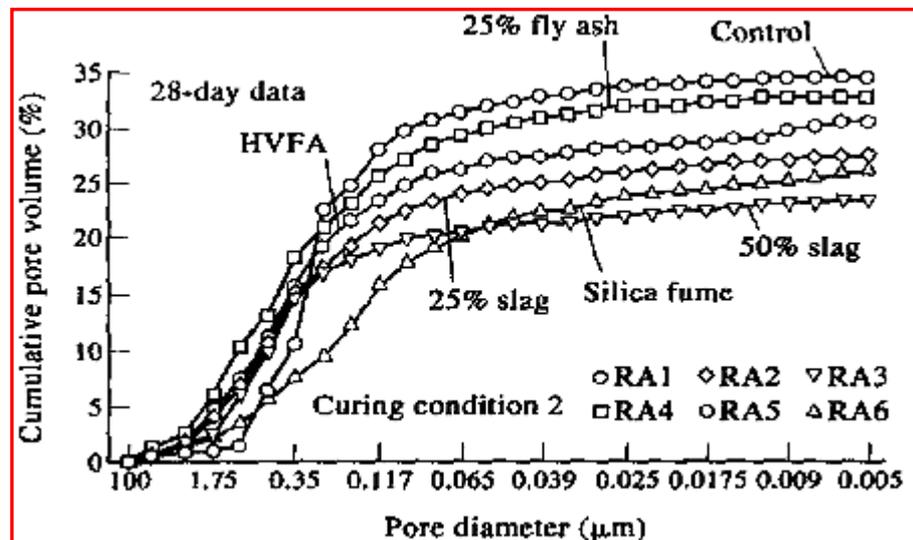


Figure 3.30: Distribution de la taille des pores du mortier durci dans une chambre climatique après démoulage [130].

AL-Khaja [131], a mené des essais d'immersion sur deux types de bétons, un Portland ordinaire OPC (C3A : 10 %, C4AF : 10,1 %) et un ciment Portland à haute résistance aux sulfates SRPC (C3A : 2,8 %, C4AF : 12,2 %). Les rapports E/C sont de 0,39 (béton à haute résistance) et de 0,48 (béton conventionnel). Les bétons ont été conservés à température ambiante pendant 28 jours, ensuite ils ont été maintenus dans une solution de chlorure de sodium à 5 % en masse aux températures 20 et 45 °C pendant 180 jours. L'auteur a constaté que pour tous les rapports E/C, l'augmentation de la température d'essai accélère la pénétration des chlorures dans le béton (Figure 3.31).

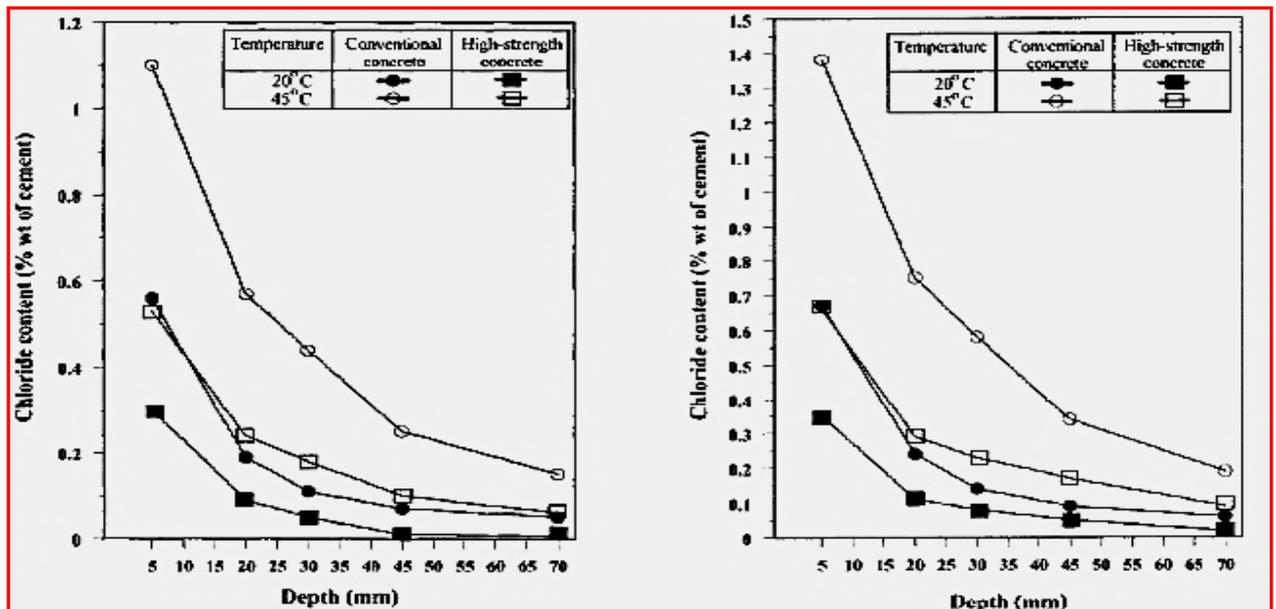


Figure 3.31: Influence de la température d'exposition sur la pénétration des chlorures dans le béton [131].

Joss and Reinhardt [132], ont montré qu'il y a une variation considérable de la diffusion des ions du chlore selon les types de béton et le type de cure (Figures. 3.32 & 3.33). La diffusion augmente de 10 à 21% pour une augmentation de température de 20 à 50° C et 8 à 21% pour 50 à 80° C.

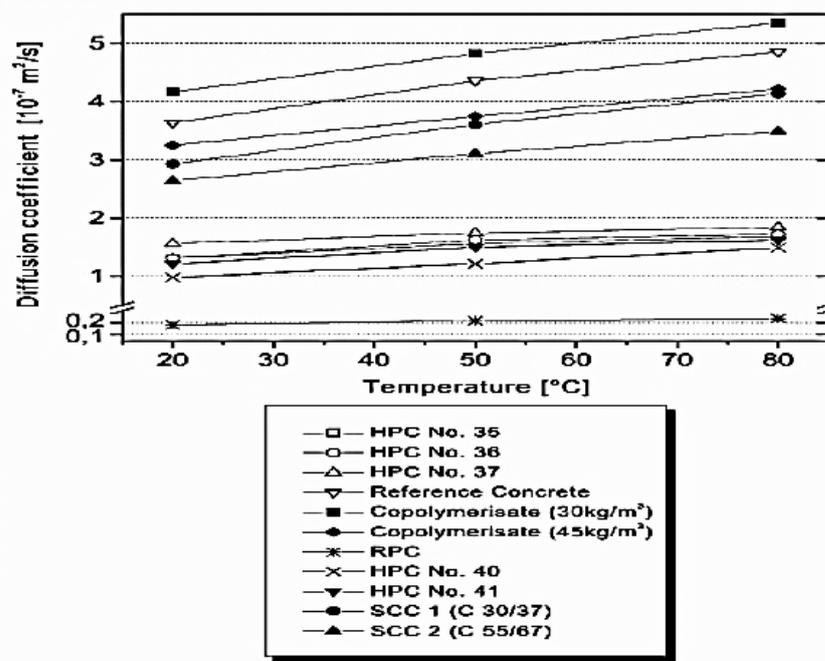


Figure 3.32: Coefficient de diffusion en fonction de la température (cure humide) [132].

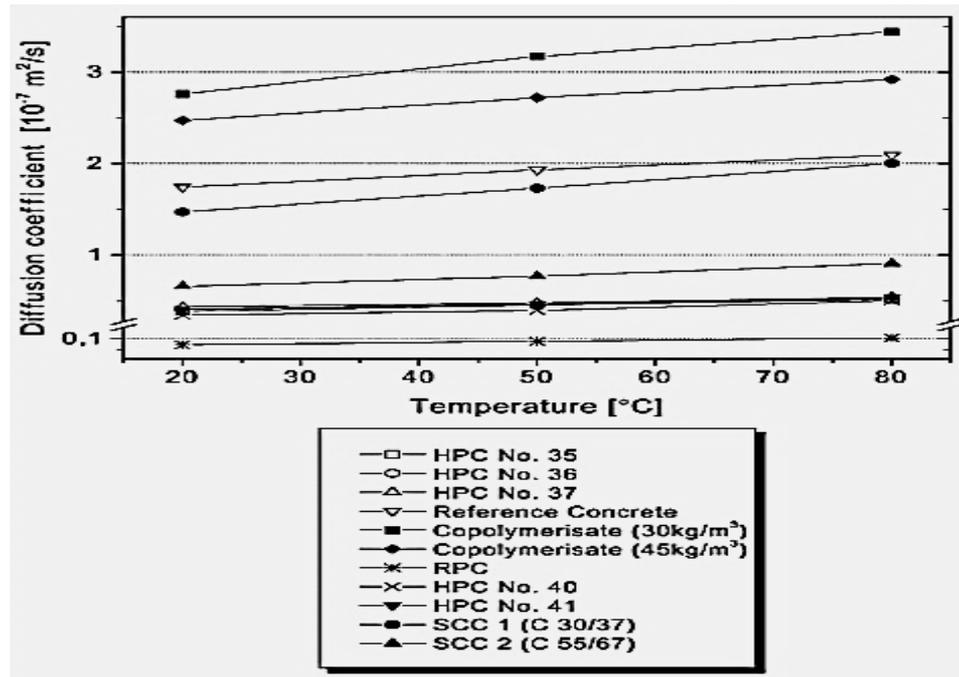


Figure 3.33: Coefficient de diffusion en fonction de la température (l'air libre) [132].

Jensen et al. [133], ont étudié le profil de pénétration des chlorures dans des pâtes par la technique d'analyse par micro-onde : ils ont utilisé un ciment Portland blanc à prise rapide, avec ou sans addition de fumée de silice, les échantillons étant immergés dans une solution de NaCl à 5 et 40 °C. Pour les pâtes de ciment blanc sans addition, E/C = 0,3, on trouve une augmentation de la pénétration des chlorures avec la température de 5 à 45 °C (Figure 3.34). Par contre, pour les pâtes de ciment blanc avec 20 % de fumée de silice, E/C = 0,3, grâce à l'utilisation de fumée de silice, la structure du matériau s'améliore avec la fermeture de la microstructure. Les chlorures ne pénètrent que dans les premiers mm du matériau et le profil de chlorures n'est, selon les auteurs, contrôlé que par la connectivité des pores. L'influence de la température n'étant pas significative (Figure 3.35).

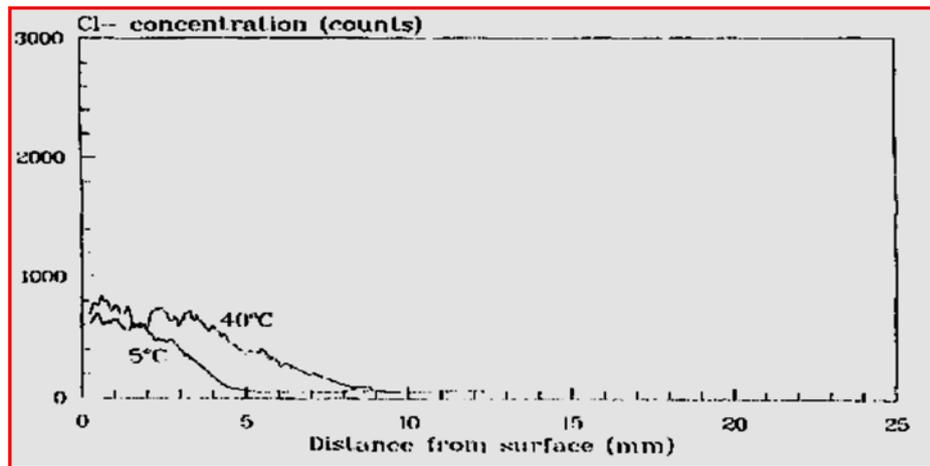


Figure 3.34: Pénétration de chlorure dans les pâtes de ciment blanc à 5 et 40 °C [133].

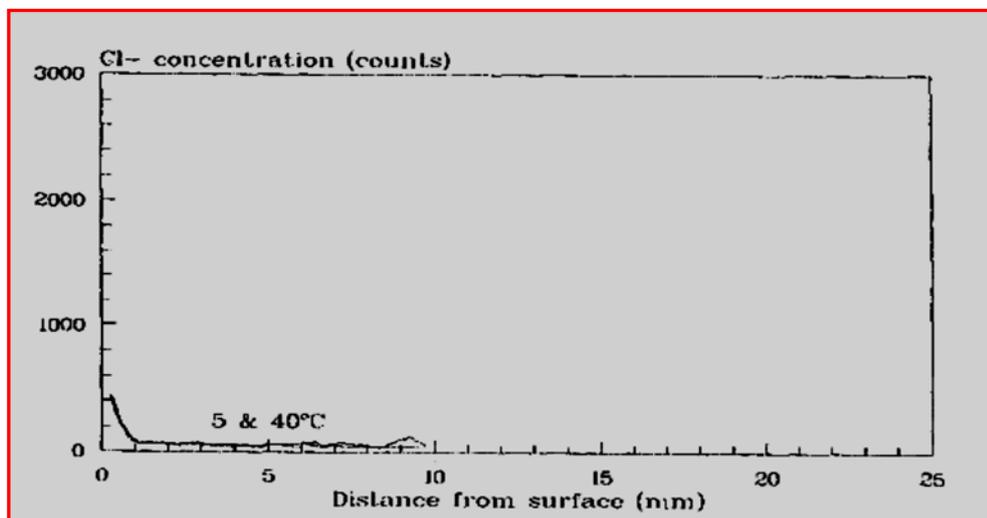


Figure 3.35: Pénétration de chlorure dans les pâtes de ciment blanc avec 20 % fumée de silice à 5 et 40 °C [133].

3.10 Effet de climat chaud sur l'absorption capillaire

Niyazi et Turker [134], ont montré que les coefficients de capillarité sont très élevés pour les bétons conservés dans un environnement naturel pour tous les taux de substitution en laitier et cendres volantes (20, 40 et 60%) (Figures 3.36 à 3.38). Ceci montre l'importance de la cure humide et confirme les résultats sur la porosité et la résistance aux ions chlore.

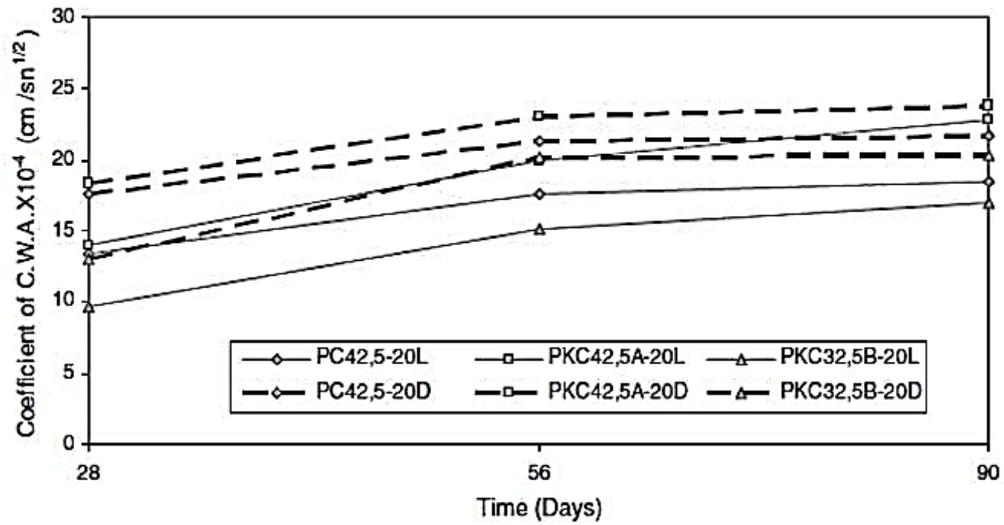


Figure 3.36: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 20% de substitution [134].

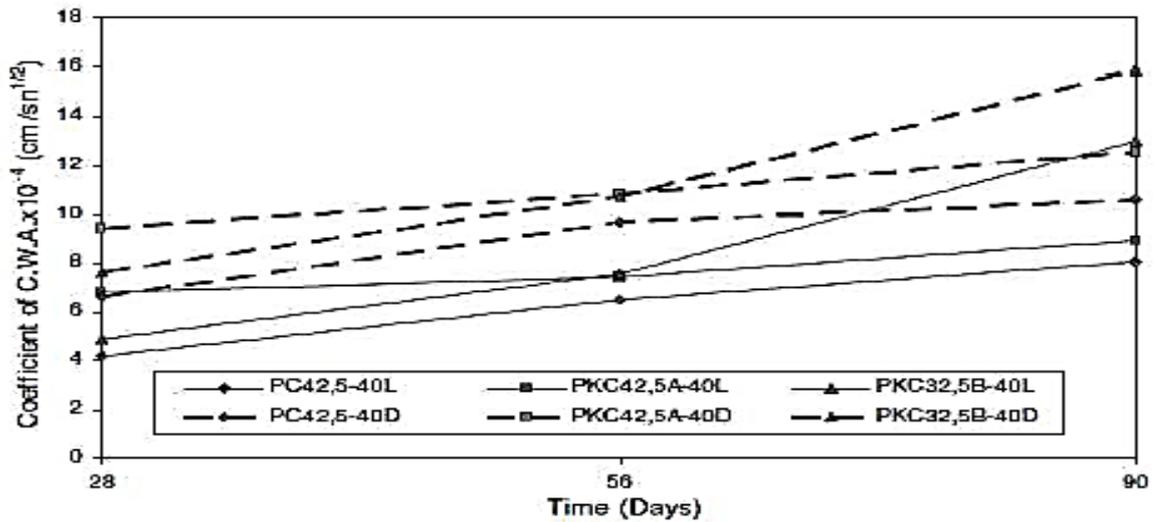


Figure 3.37: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 40% de substitution [134].

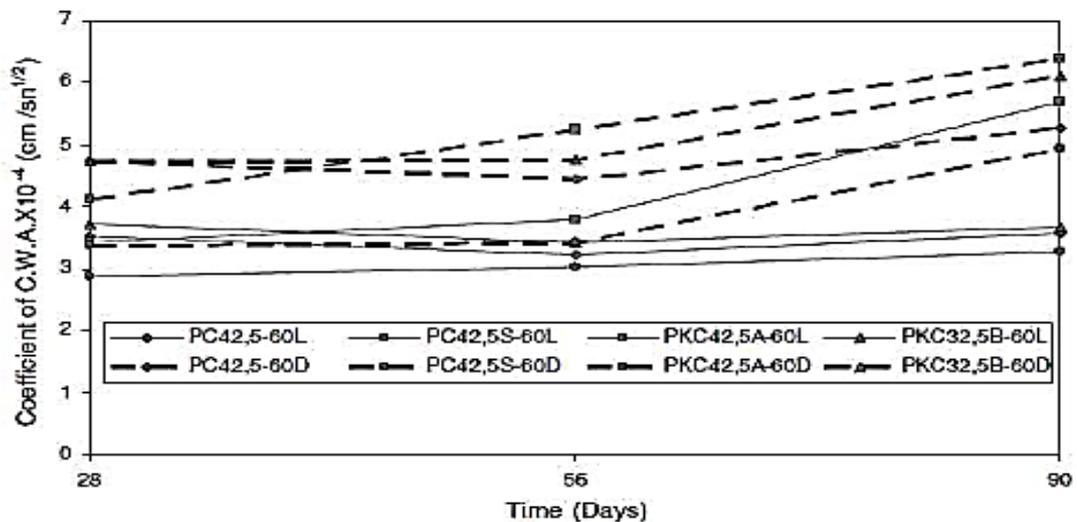


Figure 3.38: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité pour 60% de substitution [134].

3.11 Effet du climat chaud sur la Perméabilité à l'eau

Al-Khaiat et Haque [135], ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau, est beaucoup plus sensible à la mesure de cure initiale du béton léger de structure(SLWC). Alors que la résistance à la compression des éprouvettes exposées à des conditions ambiantes au bord de la mer était plus élevée que celles conservées dans l'eau (Tableau 3.1). Leur pénétration à l'eau a presque doublée lorsque la cure initiale était de 1 jour. Ces résultats indiquent l'importance de la cure initiale des structures côtières.

Joss et Reinhardt [132], ont observé que la perméabilité augmente de 13 à 62% lorsque la température est augmentée de 20 à 50° C et 3 à 55% pour une augmentation de 80° C (Figure 3.39).

Tableau 3.1: La résistance et les caractéristiques physiques de SLWC [135]

Penetration d'eau (mm) 200 x 200x 120	La cure dans l'eau	Roof Top			La résistance à 28 jours au bord de la mer		
		1 jour	3 jours	7 jours	1 jour	3 jours	7 jours
	28 jours	28 jours	28 jours	28 jours	28 jours	1 jour	3 jours
	19,6	36	29,1	26,8	38,2	32	28,6

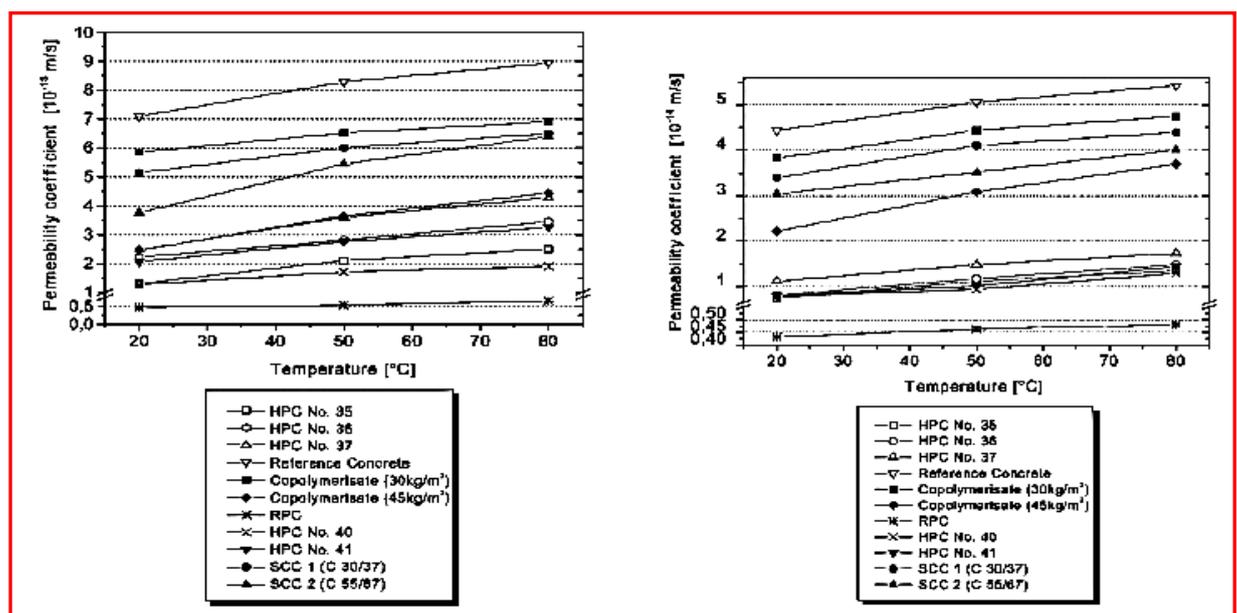


Figure 3.39: Coefficient de perméabilité en fonction de la température, pendant 1 h et 48h [132].

3.12 Conclusion

Cette étude bibliographique sur l'effet du climat chaud sur la performance des bétons ordinaires et autoplaçants a montré l'effet réfectif sur le développement de la résistance, et sur la porosité et les indicateurs de durabilité (porosité, perméabilité à l'eau, et résistance aux ions chlore).

L'utilisation des additions minérales et une cure humide initiale sont bénéfiques. L'objectif de notre étude expérimentale est d'analyser l'effet de la pouzzolane naturelle et la durée de cure humide initiale sur la performance mécanique et la durabilité du béton autoplaçant.

CHAPITRE IV :

**MATÉRIAUX UTILISES ET PROCEDURE
EXPERIMENTALE**

CHAPITRE IV :**MATERIAUX UTILISES ET PROCEDURE EXPERIMENTALE**4.1 Introduction

Dans ce chapitre on explicitera les différents matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail tout en présentant leurs caractéristiques et différentes propriétés. Dans une seconde partie, on exposera la formulation qui a été choisie pour réaliser les différents essais tant pour le mortier que pour le béton.

4.2 Caractéristiques des matériaux utilisés4.2.1 Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment composé type CEM II/A-L 42.5, fabriqué par la cimenterie de M'sila en Algérie. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5 MPa. Ces caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques sont présentées dans les Tableau 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1: Composition chimique de ciment

Composant	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Taux(%)	18.66	4.59	2.85	61.59	1.80	2.16
Composant	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	PAF	//	//
Taux(%)	0.67	0.15	0.02	7.87	//	//

Tableau 4.2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

f _{c28} (MPa)	ρ _{abs} (kg/m ³)	ρ _{app} (kg/m ³)	SSB (cm ² /g)	Consistance%	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
42.5	3040	1450	3000	29	2h42mn	4h55mn

4.2.2 La Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes [136].

La pouzzolane utilisée dans cette étude provient de la région de Béni-Saf, Wilaya de Tlemcen (Figure 4.1), c'est une roches "acide" ayant des teneurs élevées en silice, en alumine, en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. Selon les compositions chimiques centésimales du tableau 4.3, la différence entre la teneur en silice et en chaux est de 44.43% qui est supérieure à 34% et l'indice d'activité est de 0.87 supérieur à 0.67 (Tableau 4.4). Cela veut dire que la pouzzolane utilisée dans cette étude est acide et contient une phase vitreuse, donc possibilité de fixer la chaux libérée par le ciment.

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions du BAP, nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à 50 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et ainsi faciliter son broyage. Un broyeur à boulets est utilisé (Figure 4.2) d'une capacité de 5 kg (Laboratoire de la chimie industrielle à Blida). Une seule finesse de la pouzzolane de 3500cm²/g est utilisée dans notre étude. D'après la courbe de finesse de référence de la pouzzolane, le temps nécessaire de broyage est de 43 mn.



Figure 4.1 : Pouzzolane broyée.



Figure 4.2: Broyeur à boulet utilisé.

Tableau 4.3 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	NA ₂ O ₃	K ₂ O	Cl ⁻	Perte au feu
Taux(%)	53,46	17,45	8,36	9,03	3,88	1,03	4,32	1,40	0,03	4,85

Tableau 4.4 : Indice d'activité et teneur en verre de la pouzzolane naturelle

	Pouzzolane naturelle
L'indice d'activité : $R_{C_{28}}(25\%PZN)/R_{C_{28}}(0\%PZN)$	0.87
La teneur en verre : Silice (%) - Chaux (%)	44.43

4.2.3 Le sable

Deux sables sont utilisés comme mélange dans cette étude: le premier sable provenant de Baghlia, et le deuxième provenant de Bougezoul (Figure 4.3). Les caractéristiques de ces sables sont représentées dans le tableau 4.5 ci-dessous. Le sable corrigé contient un mélange de 60% de sable de Bougezoul et 40% de sable de Barglia.



Figure 4.3: Sable de Baghlia (a), Sable de Boughzoul (b).

Tableau 4.5: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé

Sables	Boughzoul 0/3	Baghlia 0/5	Mélange (60% bough+40% bagh)
Masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m ³)	1435	1660	1525
Masse volumique absolue (ρ abs (kg/m ³)	2620	2580	2604
Coefficient d'absorption (%)	0,57	0,68	0.614
Module de finesse	3.32	2.11	2.60
Composition (%)	60	40	100
Equivalent de sable visuel (%)	71.65	86.15	77.45
Equivalent de sable au piston (%)	66.45	77.20	70.75

4.2.4 Le gravier

Deux types de graviers, ont été utilisés pour la confection des bétons étudiés. Ils Présentent respectivement une granulométrie 3/8 et 8/15 (Figure 4.4). Les deux graviers provenant de carrière de Sétif. Leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau 4.6. Les courbes granulométriques du sable corrigé et graviers sont présentés sur la figure 4.5.



Figure 4.4: Gravier 8/15(a), Gravier 3/8(b).

Tableau 4.6: Caractéristiques physique de gravier

Granulats	Classe Granulaire (mm)	Papp (kg/m ³)	ρ abs (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)
Gruvier	3/8	1400	2600	0.50
	8/15	1390	2580	0.50

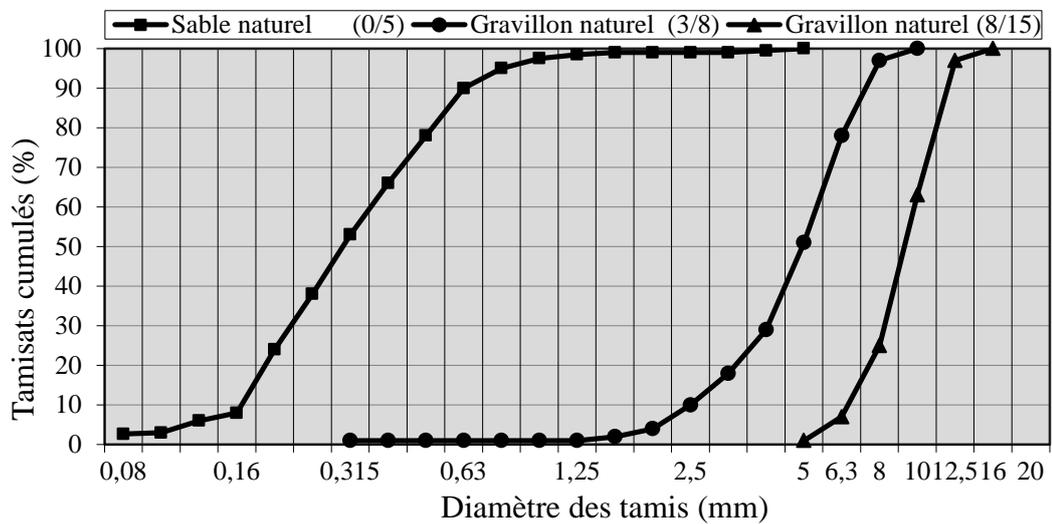


Figure 4.5: Courbe granulométrique du sable et gravier naturel.

4.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau du robinet, propre et exempte d'impuretés.

4.2.6 Les superplastifiants

Dans cette étude, le superplastifiant choisi, de dénomination commerciale MEDAFLOW 30 de la société Granitex, c'est un produit adapté pour les applications des BAP. Il se présente sous forme d'un liquide avec une plage de dosage comprise entre 0,5% à 2% en masse de poudre. Ce superplastifiant fait partie de la nouvelle génération que sont les polycarboxylates. Les polycarboxylates sont des molécules ayant un double effet pour la dispersion des particules. Le MEDAFLOW 30 permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Cet adjuvant n'a aucun effet retardateur. Sa densité est de 1.07, son Ph de 6 à 6.5 et sa teneur en chlorures inférieure à 1g/litre.

4.3 Formulations adoptées

Les principaux tests réalisés sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage. La méthode que nous avons choisie dans notre étude est la méthode japonaise d'Okamura qui vise l'optimisation du mortier [18]. L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant, qui est fixé dans cette étude à 0.40. Le dosage en superplastifiant a été optimisé par des essais sur mortier afin d'obtenir un mortier auto-plaçant homogène et stable qui nous permet de formuler un BAP.

4.3.1 Formulation du mortier auto-plaçant

Selon Jin et Domone [137], dans un BAP les propriétés du mortier sont dominantes à cause du faible volume en gros granulats par rapport à un béton ordinaire. De plus, l'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile. Pour ces causes on a commencé notre travail par des essais sur mortier pour optimiser la quantité de super-plastifiant.

La confection du mortier et les proportions de son mélange (ciment, sable, eau et super-plastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit (Figure 4.6) :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité)
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le super-plastifiant
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

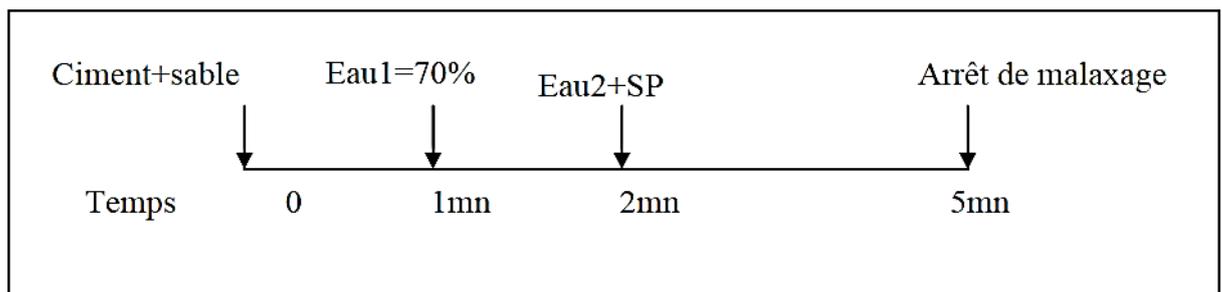


Figure 4.6: Séquence de malaxage du mortier [137].

4.3.2 Formulation du béton auto-plaçant

La formulation du BAP a été basée sur la méthode Japonaise dite la méthode générale et la formulation du béton autoplaçant est déterminée à l'aide d'un programme Excel (Annexe C) en tenant compte des différentes données relatives aux matériaux utilisés.

Trois familles ont été étudiées, à savoir un BAP sans ajouts choisi comme béton de référence et deux BAP l'un avec 15% et l'autre avec 25% de pouzzolane. Dix-huit (18) formulations ont été étudiées à savoir pour chaque pourcentage de pouzzolane, nous avons étudié six modes de cure (0,1, 3, 7,14 et 28 jours).

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 40 litres. La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par Domone et Jin [137] (Figure 4.7).

- Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante :

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}} \text{ (voir Annexe B)}$$

- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (voir Annexe B).
- Malaxer le sable, ciment, pouzzolane et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange.
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($E_{\text{eau1}} = 70\% E_{\text{eau}}$) ;
- Ajouter le super-plastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage ($E_{\text{eau2}} = 30\% E_{\text{eau}}$) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

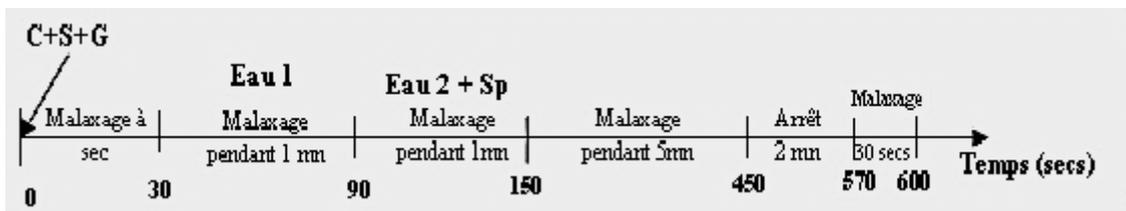


Figure 4.7: Séquence de malaxage du béton auto-plaçant [138].

4.4 Essais réalisés sur mortier autoplaçant

4.4.1 Essai d'étalement au Mini-Cône (ENFRAC, 2012)

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, le moule tronconique a une hauteur de 40 mm, un diamètre du haut de 70 mm et du bas de 80 mm. Une fois le moule est soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne. La figure 4.8 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

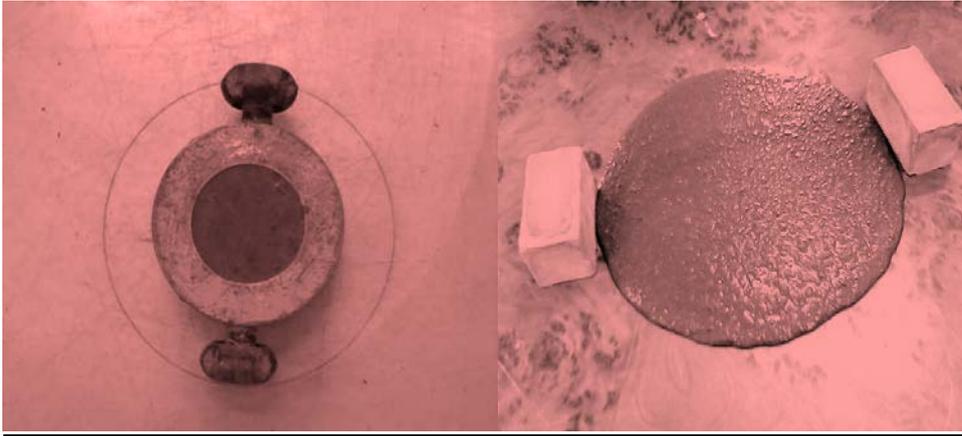


Figure 4.8: Essai d'Étalement pour Mortier.

4.4.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) (EFNARC, 2012)

Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant un volume de 1.1 litre de mortier à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre. Le cône doit être solidement fixé pour ne pas être déplacé par les vibrations et sa partie supérieure doit être horizontale. Le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 4.9). Chai [139], a travaillé avec des matériaux Anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s. Tandis que (Nawa et al. [140], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi.

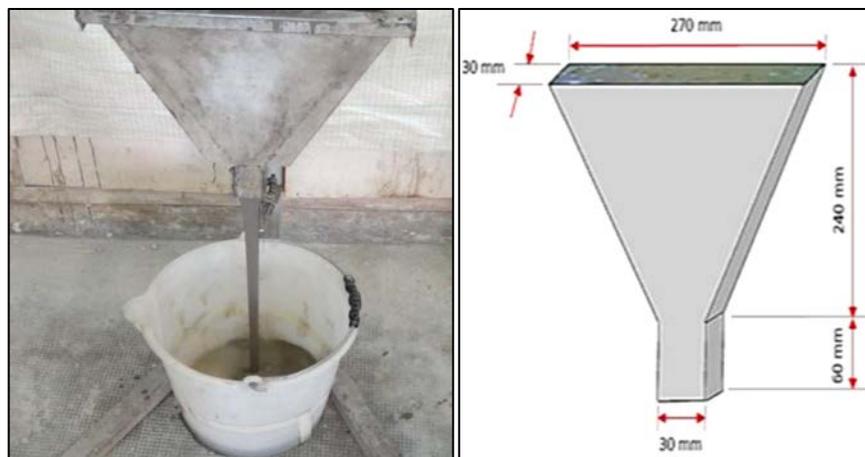


Figure 4.9: Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

4.5 Essais réalisés sur béton autoplaçant

4.5.1 Essais à l'état frais

La qualité du béton à l'état frais a été vérifiée selon les recommandations d'EFNARC, 2012 et l'AFGC 2008 [141, 26]. Différents essais spécifiques permettent de caractériser le BAP à l'état frais. Les essais présentés ci-dessous caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais qui ont été réalisés dans le cadre de cette étude.

4.5.1.1 Essai d'étalement (Flow test)

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer la capacité du béton à se déformer sous son poids propre (Figure 4.10).

L'essai est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de base inférieur est de 200 mm et le diamètre de base supérieur est de 100 mm. La hauteur du cône est de 300 mm, il est habituellement utilisé pour caractériser les bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50 cm, et qui nous renseigne sur la vitesse d'étalement du béton. Selon (EFNARC, 2012), la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes (Tableau 4.7). Le tableau 4.8 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP.



Figure 4.10 : Essai d'étalement (Flow test).

Tableau 4.7 : Classes des BAP et domaine d'utilisation (EFNARC, 2012)

Classe	Étalement (mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550 - 650	<ul style="list-style-type: none"> • Structures non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les Dalles) • Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels) • Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660 - 750	<ul style="list-style-type: none"> • La majorité des applications
SF3	760 - 850	<ul style="list-style-type: none"> • Applications verticales • Structures trop ferrillées • Coulage à partir du dessous du coffrage • Structures de forme complexe

Tableau 4.8: Classification des BAP selon leur application (EFNARC, 2012)

Intervalle d'écoulement (mm)	Application horizontale		Application verticale
	Épaisseur ≤ 300 mm	Épaisseur > 300 mm	
$I \geq 100$	1	2	2
$80 \leq I \leq 100$	2	2	3
$T \leq 80$	3	3	3

4.5.1.2 Essai à la couronne J (J-Ring test) (AFGC, 2008)

La capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant sont étudiées par l'essai à la couronne J (J-ring test). On l'appelle aussi l'essai d'étalement modifié (J-Ring). Cet essai permet aussi d'étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. Trois paramètres seront mesurés dans cet essai : l'étalement, le temps d'écoulement T50J et le blocage (AFGC, 2008).

Il consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage (Figure 4.11). A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il

s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

On mesurera en premier lieu le plus grand diamètre de la galette du BAP d_{max} (Figure 4.12), puis le diamètre perpendiculaire d_{perp} , puis on calculera l'étalement à partir de la formule suivante :

$$S_J = \frac{(d_{max} + d_{perp})}{2} \dots \dots \dots (4.1)$$

La différence d hauteurs BJ du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring est aussi mesurée pour pouvoir confirmer ou infirmer le blocage. Les hauteurs sont montrées sur la figure 4.13. D'après (Domone et Jin, 1999) pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence de hauteur BJ ne doit pas dépasser 10 mm. BJ est calculée avec la formule suivante :

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1}) + (\Delta h_{x2}) + (\Delta h_{y1}) + (\Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \dots \dots \dots (4.2)$$

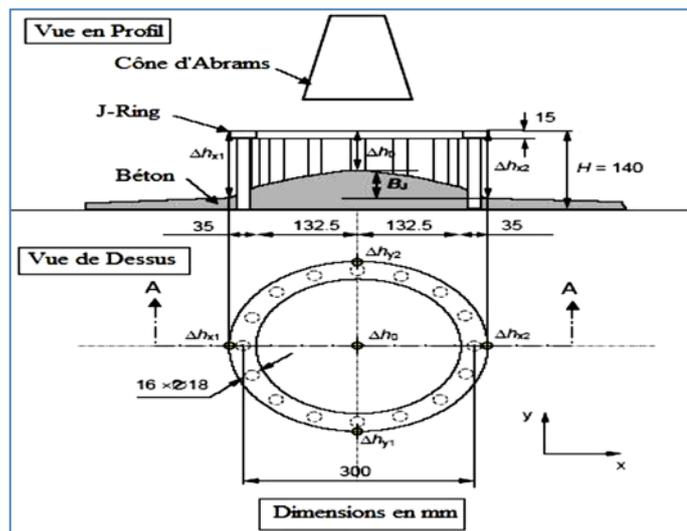


Figure 4.11 : Dimensions du J-ring et méthode de mesure de la différence de hauteurs.



Figure 4.12 : Mesure d'étalement en présence du J-Ring.



Figure 4.13 : Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.

4.5.1.3 Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir mis en place par Okamura et Ozawa en 1995 permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en secondes (Figure 4.14).

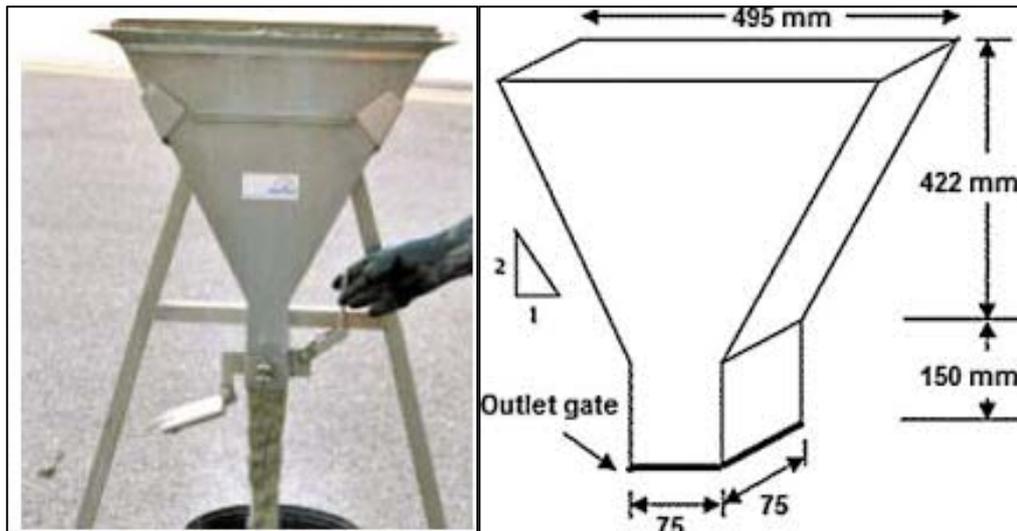


Figure 4.14 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V-funnel.

4.5.1.4 Essai à la boîte en L (L-Box test)

Avec l'essai à la boîte en L, il est possible de tester la capacité de remplissage et la capacité de passage du béton auto plaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L (Figure 4.15). Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm). Soit environ 12,7 l de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos une (1) minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale figure 4.8. Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange. Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton T20 pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton T40 pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2.

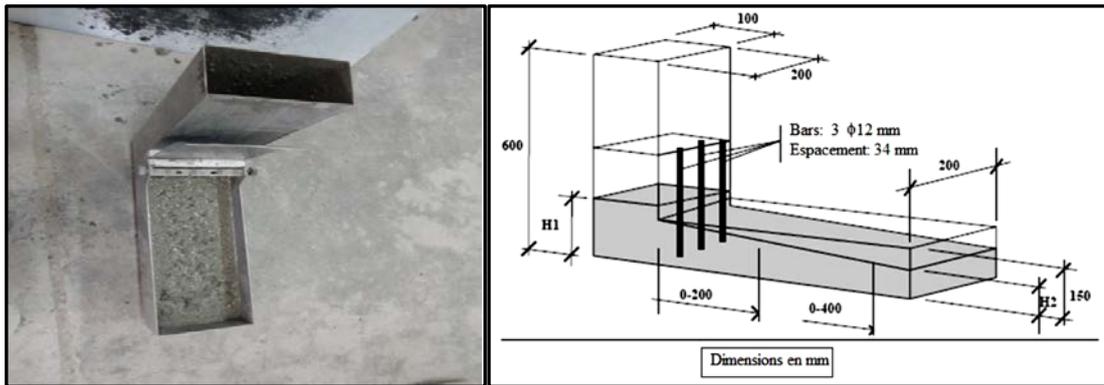


Figure 4.15 : Dispositif de l'essai L-Box.

4.5.1.5 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage selon (AFGC, 2008)

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité (Figure 4.16). L'essai nécessite un seau de 10 litres avec un couvercle, un tamis de maille 5 mm, un fond et une bascule avec précision. Un échantillon de 10 litres de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$ de l'échantillon sur un tamis de 5 mm posé sur le fond avec une hauteur de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$. Après 2 min d'attente, on pèse le poids de laitance qui est traverser le tamis et on calcule le pourcentage de la laitance selon l'expression:

$$\%_{Laitance} = \frac{P_{Laitance}}{P_{Echantillon}} \times 100 \dots\dots\dots (4.3)$$

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes [2]:

- $0\% < P_{LAITANCE} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{LAITANCE} < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{LAITANCE} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

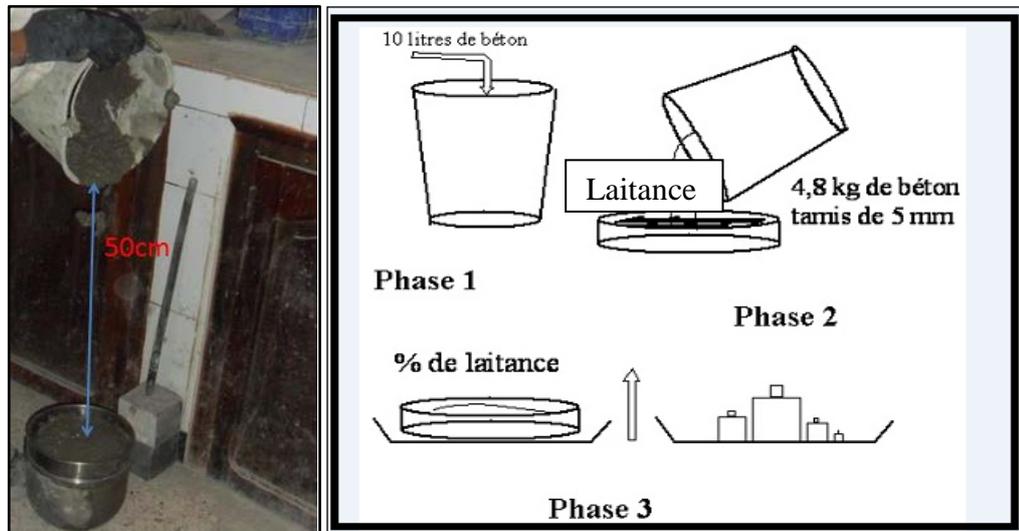


Figure 4.16: Essai de résistance à la ségrégation.

4.5.1.6 Essai Rhéomètre

L'essai rhéomètre est basé sur les démarches présentées par de Lanos et Estélé [138]. C'est un outil élaboré pour caractériser la rhéologie des bétons frais. Leur utilisation est destinée à une mesure en laboratoire. Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon vane à quatre pales de 15 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 30x30cm, présenté sur la figure 4.17. Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur.

Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de BAP frais et de mesurer le couple appliqué.

L'essai, peut être résumé comme suit:

- ✓ On verse le BAP préparé dans le récipient ;
- ✓ On fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier.
- ✓ On démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié à l'aide du logiciel.



Figure 4.17: Essai au Rhéomètre.

Le profil de vitesse choisi permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). Le profil de vitesse est illustré sur la figure 4.18.

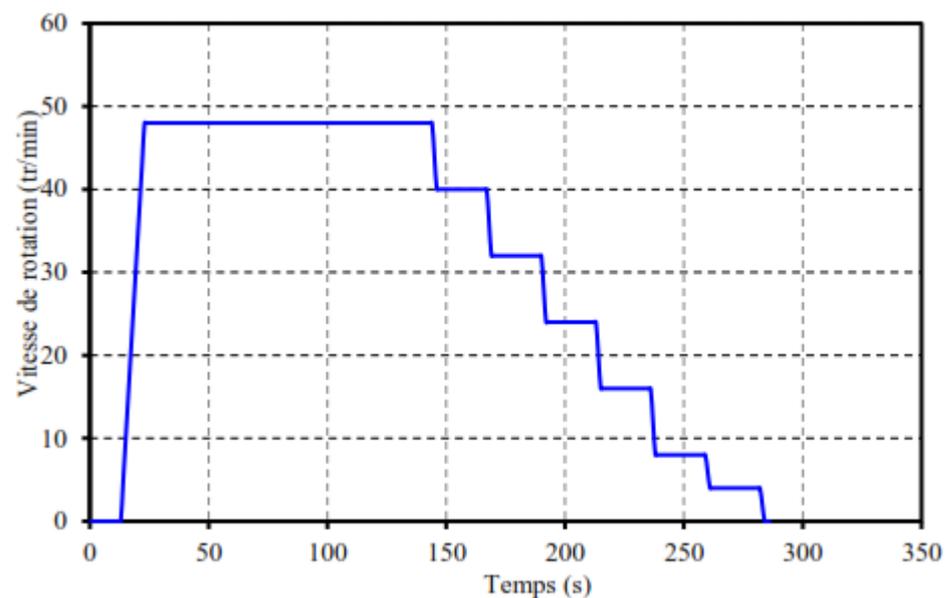


Figure 4.18: Profil de vitesse [142].

4.5.2 Essais à l'état durci

4.5.2.1 Résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression a été effectué sur une presse de capacité de 3000 kN (Figure 4.19), conformément à la norme NF P 18-406 [143]. La vitesse de chargement est de 0.5 kN/s. La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cubiques (100x100x100) mm³ pour chaque mélange du béton à l'âge de 28 et 90 jours.

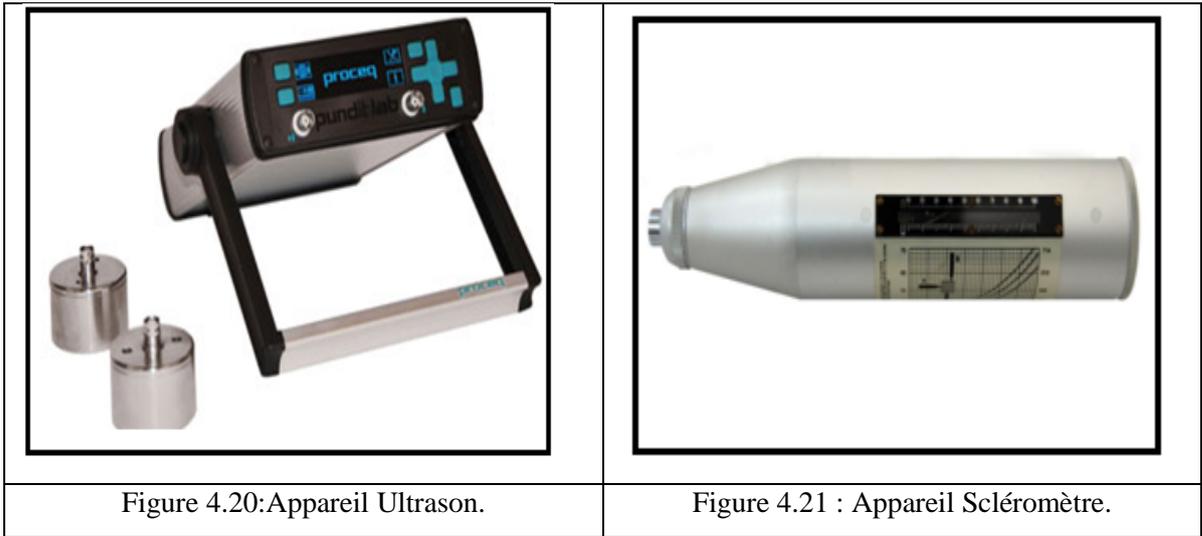


Figure 4.19: Dispositif de l'essai de compression simple.

4.5.2.2 Essais non destructifs (Scléromètre et Ultrason)

Les deux essais non destructif scléromètre et ultrason ont été réalisés à l'âge de 90 jours sur des éprouvettes cubiques (150x150x150) mm³, et éprouvettes prismatiques (70x70x280). L'essai aux ultrasons (Figure 4.20) a été effectué en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection selon la norme NF EN 12504-4 [144].

Les essais au scléromètre (Figure 4.21) ont été effectués à la position horizontale de l'appareil sur les quatre faces de l'éprouvette maintenue entre les plateaux par compression sous une charge initiale de l'ordre de 15 % de la charge finale et conformément à la norme NF EN 12504-2 [145].



4.5.2.3 Absorption capillaire

Pour les essais de l’absorption capillaire des éprouvettes de formes cubiques (100x100x100 mm) sont pré conditionnées conformément aux recommandations de la procédure d’ASTMC1585 [146]. Les éprouvettes ont été conservées dans une étuve ventilée à 80 ±2 °C, jusqu’à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.1%. Les faces latérales des éprouvettes ont été enduites par une résine (medapoxy colle) pour assurer l’écoulement unidirectionnel et éviter l’évaporation latérale de l’eau absorbée. Les éprouvettes ont été immergées dans l’eau du récipient sur une hauteur maximale de 5mm à l’aide des cales (Figure 4.22). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l’aide d’une éponge, pesées puis remis dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 1min, 5min, 10 min, 20min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 1jour et ensuite chaque jour jusqu’à 8 jours. Le coefficient d’absorption capillaire est défini par l’équation suivante :

$$C = \frac{M_x - M_o}{A} (kg/m^2) \dots \dots \dots (4.4)$$

Où

M_x: Masse de l’éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_o : Masse initiale de l’éprouvette (kg),

A : Section de l’éprouvette (m²).



Figure 4.22: Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

4.5.2.4 La porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité accessible à l'eau est par définition le pourcentage du volume des vides V_v par rapport au volume total V_t . Selon la norme NF18-459, il s'agit de la détermination par pesée de la masse apparente d'un échantillon du béton après immersion dans l'eau après saturation sous vide. Pour déterminer la masse sèche, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la différence de deux pesées successives, ne dépasse pas 0.1%. L'échantillon est placé dans une enceinte fermée appelée dessiccateur (Figure 4.23), sous une pression constante pendant 4 heures. Ensuite l'eau est introduite progressivement jusqu'à remplissage et l'échantillon soit recouvert d'environ 20 mm d'eau. L'échantillon est maintenu dans la saturation pendant $18 \pm 2\text{h}$. Les éprouvettes ont été sorties du récipient et pesées dans l'eau et dans l'air avec une balance hydrostatique pour déterminer respectivement M_{eau} pour M_{air} (Figure 4.24).

La porosité accessible à l'eau, ε , est exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \dots \dots \dots (4.5)$$

M_{eau} : La masse du spécimen immergé dans l'eau (g),

M_{air} : La masse du spécimen pesé dans l'air (g),

M_{sec} : La masse du spécimen sec (g).

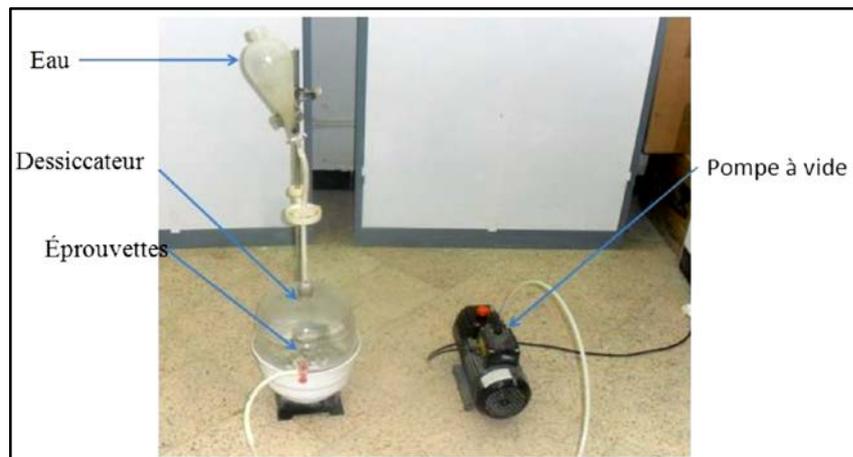


Figure 4.23: Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.



Figure 4.24: Balance hydrostatique.

4.5.2.5 Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués selon la norme DIN 1048 [147]. Cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150 mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de $72\text{h} \pm 2\text{h}$ (Figure 4.25). L'essai a été réalisé à l'âge de 90 jours sur des éprouvettes conservées dans deux différents modes de cure. La pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette. Après 72 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai

Brésilien). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (Figure 4.26).



Figure 4.25 : Essai de perméabilité à l'eau.



Figure 4.26: Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.

4.6 Mode de cure

Les éprouvettes de BAP sont soumises à deux modes de cure différents, le premier est dans un environnement humide après décoffrage ($T=20^{\circ}$, $H.R=100\%$) dans un bac à l'intérieur du laboratoire, le deuxième mode de cure est la conservation des éprouvettes sur le toit du laboratoire pendant la période d'été (juin, juillet et août) (Figure 4.27). La température de la région varie pendant la période d'essai de 35°C à 40°C , et l'humidité relative varie de 65

à 70%. La figure 4.28 montre la variation de la température et l'humidité relative pendant les mois d'été à Blida.



Figure 4.27: Les éprouvettes conservées dans l'eau douce et à l'aire libre.

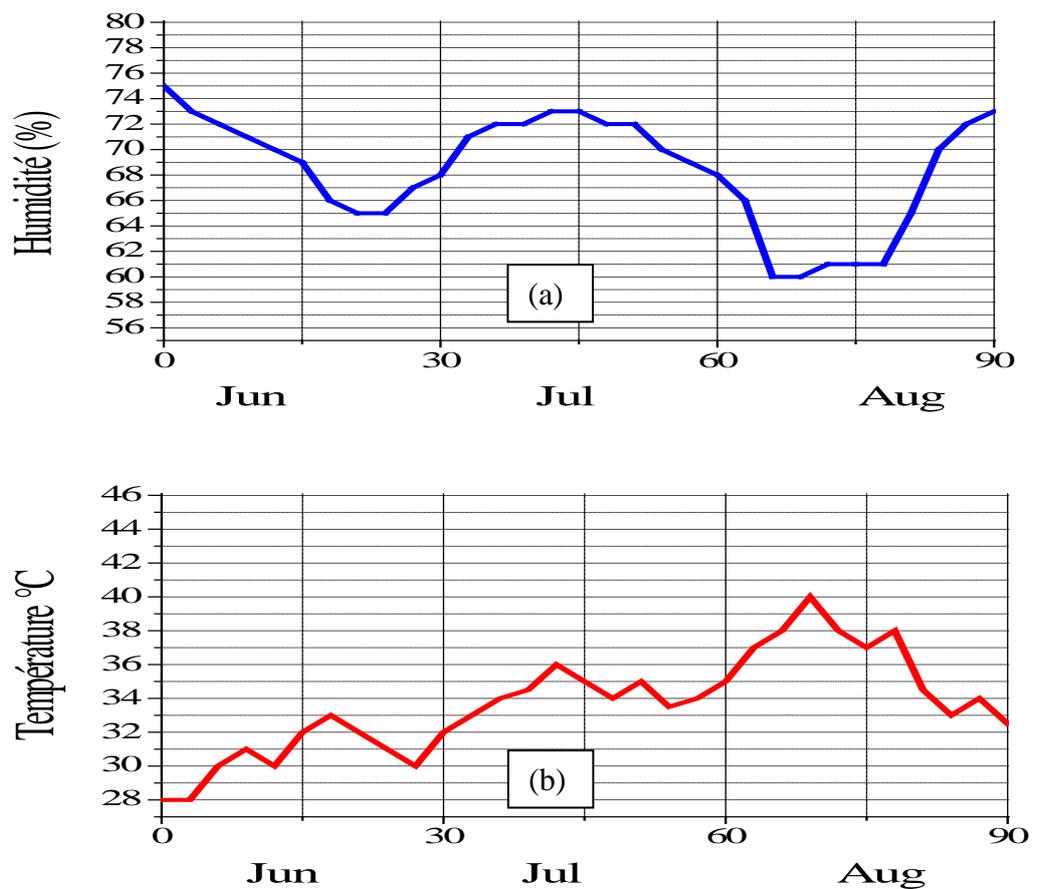


Figure 4.28: Variation de l'humidité relative (a) et de la température (b) dans la région durant la période des tests (Météo Blida).

4.7 Récapitulatif des essais réalisés

La figure 4.29 résume le programme expérimental que nous avons réalisé. L'étude expérimentale est divisée en deux parties. La première partie expérimentale a été consacrée pour la formulation du béton en se basant sur la méthode japonaise et la deuxième partie, nous avons étudié l'effet de la pouzzolane substituées au ciment et de l'environnement sur la durabilité du béton autoplaçant. Les pourcentages de pouzzolane utilisés sont de 0, 15, et 25%. Deux modes d'environnements de cure ont été étudiés dans la présente étude :

- une cure humide dans l'eau après décoffrage (HR =100% et $T=20 \pm 2$ °C) ;
- à l'air libre après décoffrage sur la terrasse du laboratoire dans la zone de Blida pendant la période de l'été, après une cure initiale de 0, 1,3, 7,14 et 28jours.

Des essais sur la rhéologie de BAP ont été réalisés. La durabilité du BAP a été mesurée par les essais de la porosité accessible à l'eau, Absorption d'eau par capillarité et la perméabilité à l'eau.

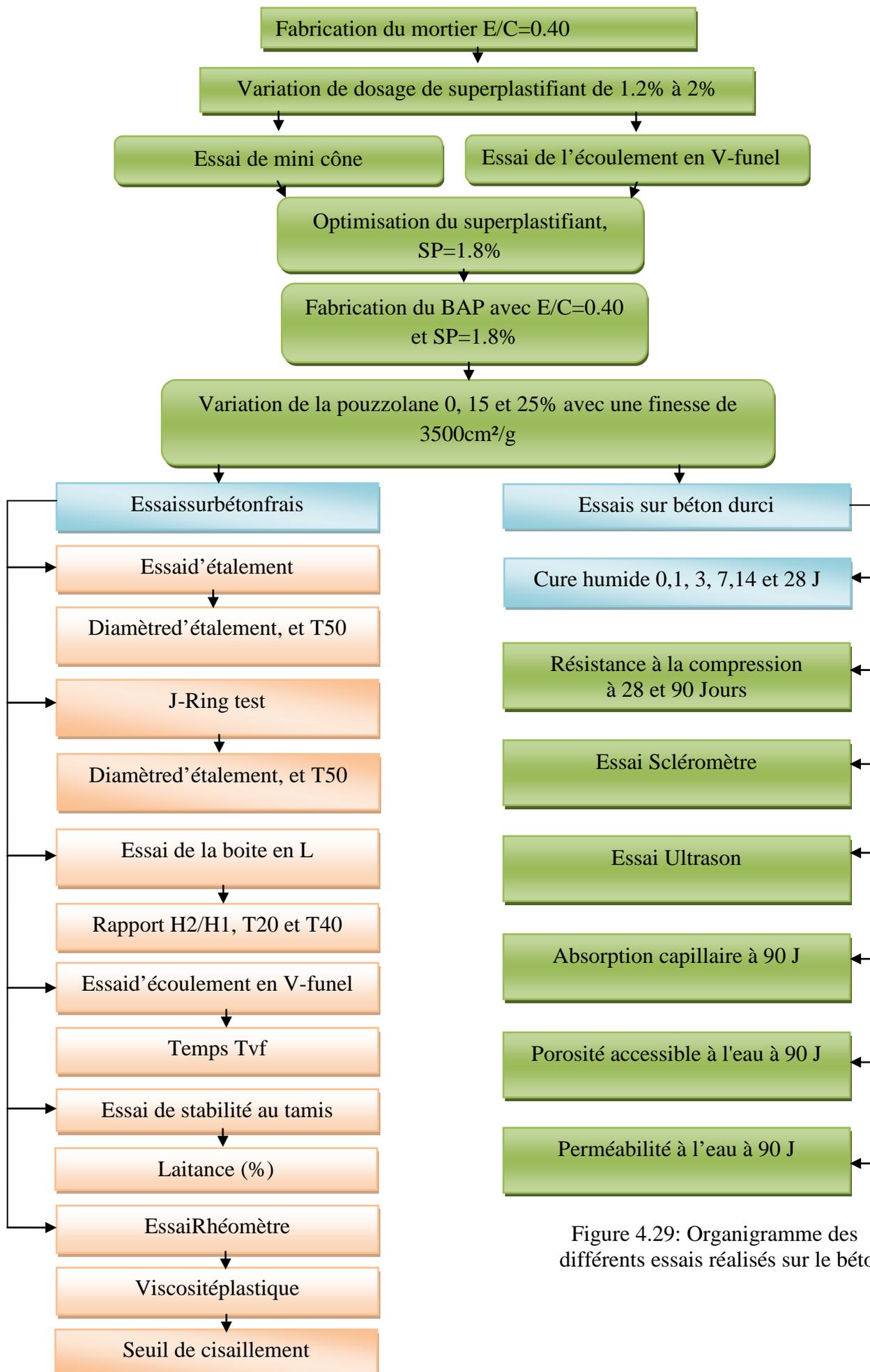


Figure 4.29: Organigramme des différents essais réalisés sur le béton.

CHAPITRE V :

RÉSULTATS

EXPERIMENTAUX ET INTERPRÉTATIONS

CHAPITRE V :**RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS****5.1 Introduction**

On présente dans ce chapitre les résultats obtenus expérimentalement sur l'effet d'incorporation de la pouzzolane à l'état frais et à l'état durci. Nous avons commencé par les essais d'optimisation du dosage en super plastifiant afin d'obtenir un MAP que l'on pourra utiliser par la suite dans la formulation du BAP.

5.2 Essais sur mortier**5.2.1 Optimisation du dosage de super-plastifiant**

L'optimisation du dosage de super-plastifiant (SP) consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer une meilleure performance du béton auto-plaçant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher le dosage optimal pour les valeurs 1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 et 2%, avec un rapport E/C de 0,40 pour toutes les compositions tout en faisant varier le dosage de SP. Pour chaque dosage, des mesures d'étalement et de temps d'écoulement ont été effectués sur les mortiers correspondants. Les différentes compositions obtenues pour 1.81 litres de mortier en fonction du rapport SP/L sont présentées dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1: Différentes compositions obtenues pour 1.81 litres de mortier en fonction du rapport SP/L

SP (%) (kg)	1.2%	1.4%	1.6%	1.8%	2%
Ciment (kg)	1.284	1.284	1.284	1.284	1.284
Sable (kg)	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576
Eau (kg)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
SP (kg)	0.015	0.018	0.021	0.023	0.026

5.2.1.1 Effet du superplastifiant sur l'étalement

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers auto-plaçant sont présentés dans le tableau 5.2. La figure 5.1 montre l'effet du dosage de super-plastifiants sur l'étalement des mortiers au mini-cône. En faisant varier le dosage en super-plastifiant, ces résultats montrent l'existence d'un dosage optimal et un dosage de saturation. Chaque dosage de SP permet d'avoir une valeur d'étalement dans l'intervalle d'étalement des MAP définie par Domone et al. [137]. En revanche, on remarque une ségrégation et un ressuage visuel pour le dosage en SP de 2%.

Tableau 5.2: Valeurs d'étalement en fonction de dosage de super-plastifiant.

Dosage en Super-plastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	Norme
Étalement D(mm)	147,5	260	277,5	307	335	270-330

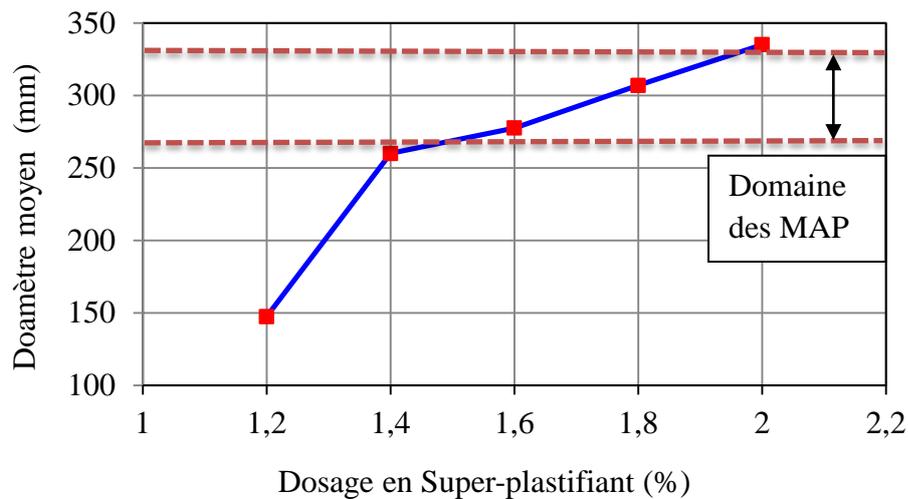


Figure 5.1: Valeurs d'étalement en fonction du dosage de Super-plastifiant

5.2.1.2 Effet de superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel)

Le temps d'écoulement que l'on mesure permet d'évaluer la fluidité du mortier. Plus ce temps est long, plus la fluidité diminue et plus il est court, plus le mortier est fluide. Donc la fluidité d'une pâte est inversement proportionnelle au temps d'écoulement. Les résultats de l'essai au Vfunnel des mortiers auto-plaçant sont présentés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3: Valeurs du temps au V_{funnel} en fonction de dosage de super-plastifiant.

Dosage en Super-plastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	Norme
Tvf(s)	34	7,04	6,47	5,58	4,59	2-10

Les temps d'écoulement des mortiers auto-plaçant diminuent sous l'effet du super-plastifiant, jusqu'à atteindre le dosage de saturation. Au-delà du point de saturation, le temps d'écoulement au cône ne décroît plus d'une manière appréciable, il est inutile de rajouter du super-plastifiant dans la pâte car nous n'améliorons en rien la fluidité de la pâte de ciment.

La figure 5.2 montre la variation du temps d'écoulement du mortier à travers l'orifice de dispositif (V-Funnel) en fonction de dosage de super-plastifiant. Ces résultats montrent que tous les dosages en super-plastifiant vérifient les exigences normatives ($T_{vf} < 10s$) à l'exception du dosage 1.2% qui a donné un temps d'écoulement plus élevé (34 sec). Le dosage en Sp/L=1.8% donne un temps de 5.58 sec et présente une fluidité plus importante. Sans présence de ségrégation ni de ressuage. Cette valeur est susceptible d'être considéré comme un dosage optimal de super-plastifiant (Sp/L=1.8. Le superplastifiant améliore l'ouvrabilité du mélange, mais à partir d'un certain seuil il devient inutile parce qu'il atteint le dosage de saturation qui ne permet pas de modifier de façon significative la rhéologie du mélange.

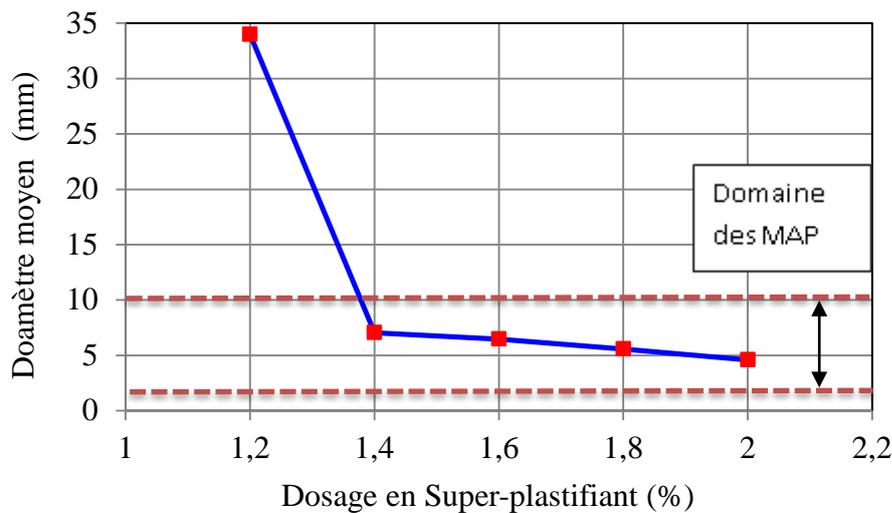


Figure 5.2: Temps d'écoulement en fonction du dosage de super-plastifiant.

Selon adjouj [65], la nature des super-plastifiants jouent un rôle fondamental dans l'amélioration des propriétés rhéologiques des mortiers et des bétons. L'auteur a introduit deux super-plastifiants à différents dosages dans la composition d'un mortier sans addition minéral. Les résultats ont montré que le super-plastifiant PC, à base de polycarboxylates, est plus efficace et apporte un grand gain d'ouvrabilité lorsqu'il est dosé au-delà de 0.2%. Pour ce dosage l'affaissement atteint 12 cm tandis que pour le super-plastifiant LS, à base de lignosulfonate, il n'est que de 10 cm.

Golaszewski et Szwabowski [116], ont constaté que les super-plastifiants à base de polycarboxylate étaient plus efficaces que les super-plastifiants à base de naphthalène sur l'amélioration des propriétés rhéologiques des mélanges. En étudiant les performances des super-plastifiants à base de polycarboxylates, Falikman et al [148], ont montré que ces super-plastifiants assuraient les mêmes performances rhéologiques et mécaniques avec des dosages de 2.7 à 3.3 fois plus inférieurs que les super-plastifiants conventionnels à base de poly-naphthalène. Aïtcin [7], a montré que lorsqu'on utilise un super-plastifiants à très forts dosages, cet effet enveloppant peut retarder l'hydratation des grains de ciment, quelle que soit la nature du super-plastifiant, du type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains. Sugamata et al [149], ont aussi étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien du comportement rhéologique d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage d'un super-plastifiant n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

5.2.2 Effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais

5.2.2.1 Etalement au mini cône

Le tableau 5.4 et la figure 5.3 présentent les différents résultats de l'essai au mini cône correspond à la variation de l'étalement du mortier en fonction de la teneur en pouzzolane pour un dosage en superplastifiant de 1.8%. On remarque une diminution de l'étalement du mortier de 307 mm à 279 mm (soit une décroissance de 9.12 %) pour des taux de substitution respectifs de 0% à 25% du ciment par la pouzzolane. Tous les résultats que nous avons obtenus sont compris dans l'intervalle défini par Domone [137].

Tableau 5.4: Valeurs d'étalement en fonction de dosage en pouzzolane

Teneur en pouzzolane (%)	0	15	25
Etalement (mm)	307	298	279

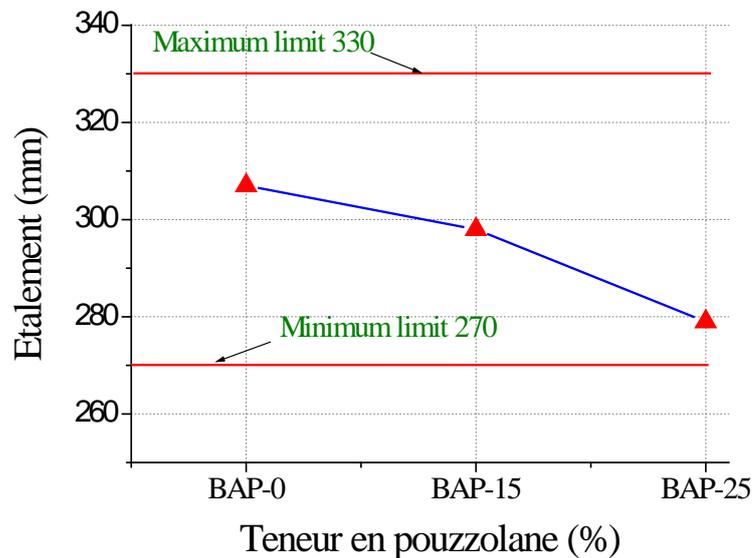


Figure 5.3: Effet de la teneur en pouzzolane sur l'étalement des MAP.

5.2.2.2 Temps d'écoulement (T_{vf}) au V-Funnel

Les résultats du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de pouzzolane sont indiqués sur le tableau 5.5 et la figure 5.4. On note qu'une croissance du temps d'écoulement de l'ordre de 5.6 sec à 7.9 sec est observée (soit un pourcentage de croissance de 41%), qui dépend principalement du pourcentage de l'addition de la pouzzolane. Tous les résultats obtenus dans le cadre de nos essais relatifs au temps d'écoulement sont inclus dans l'intervalle 2 à 10 secondes. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude réalisée par Domone et al. [137]. En revanche, une augmentation linéaire du temps d'écoulement est observée pour les dosages de substitution du ciment par la pouzzolane qui passe de 0 à 25% à cause de la perte de fluidité du mortier.

Tableau 5.5: Valeurs du temps au V_{funnel} en fonction de dosage en pouzzolane

Teneur en pouzzolane (%)	0	15	25
Tvf (s)	5.6	6.8	7.9

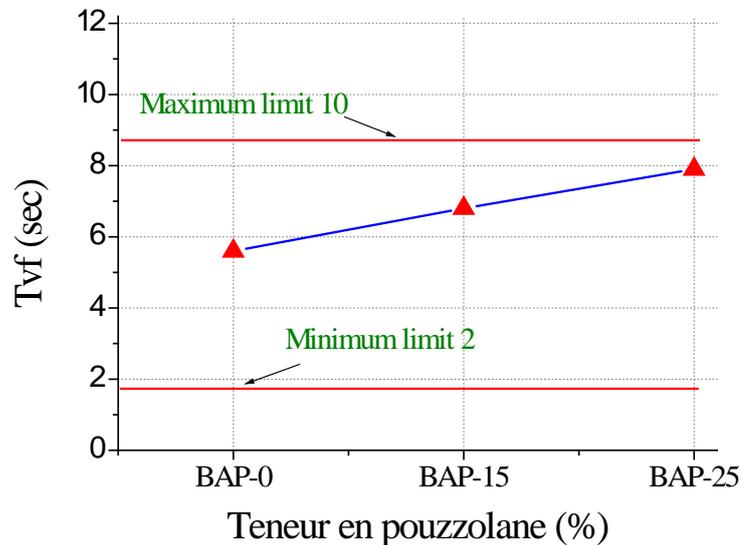


Figure 5.4: Effet de la teneur en pouzzolane sur le temps d'écoulement des MAP.

5.3 Essais sur béton auto-plaçant.

5.3.1 Compositions utilisés pour les BAP

Pour la composition du béton autoplaçant, le rapport E/C a été fixé à 0.40 avec un dosage de super plastifiant de 1.8% optimisé par des essais sur mortier. La fabrication du béton a été basée sur la méthode Japonaise dite méthode générale. Trois compositions ont été étudiées en changeant le taux de substituant de pouzzolane de 0, 15 et 25%. Le tableau 5.6 récapitule les trois compositions des BAP testés.

Tableau 5.6: Composition des BAP testés en kg/m^3

Compositions	BAP-0	BAP-15	BAP-25
Ciment	484,63	413,89	366,78
Pouzzolane	00	67,51	113,01
Gravier (3/8)	243,87	243,87	243,87
Gravier (8/15)	488 ,85	488 ,85	488 ,85
Sable	907,37	907,37	907,37
Eau	193,69	193,69	193,69
Super-plastifiant	8,24	8,24	8,24

5.3.2 Effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.

La qualité du béton à l'état frais a été vérifiée suivant les essais recommandés par les recommandations d'EFNARC (2012) [141]. Les valeurs d'étalement au cône, J-Ring test, écoulement à la boîte en L, essai V-Funnel, la capacité de remplissage et résistance à la ségrégation et l'essai rhéomètre sont présentées dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7: Propriétés des BAP étudiés à l'état frais

N°	//	//	BAP-0	BAP-15	BAP-25	EFNARC (2012)
1	Etalement	Diamètre (mm)	755	732	654	550 à 850
		Temps T ₅₀₀ (s)	2.86	3.52	4.15	2 à 5
		Diamètre (mm)	745	729	651	550 à 850
2	T-Ring test	ΔH (mm)	9.3	9.45	9.8	≤ 10
		T500j (sec)	3.15	4.20	4.5	2 à 5
3	V _{funnel}	Temps T _{Vf} (s)	7.86	8.16	9.65	6 à 12
4	L-Box	Rapport H ₂ /H ₁	0.88	0.84	0.81	0.80 à 1.00
		T ₂₀₀ (s)	0.68	0.86	1.10	/
		T ₄₀₀ (s)	1.22	1.43	2.13	/
5	Ségrégation	Laitance (%)	9.22	6.15	4.11	0 à 15
6	Essai rhéomètre	Seuil de cisaillement(τ) (Pa)	9.21	20.54	25.14	/
		Viscosité plastique (μ) (Pa.s)	6.26	9.93	11.55	/

a. Étalement et Temps T₅₀₀ au cône d'Abrams

Comme le montre les figures 5.5 et 5.6, les valeurs d'étalement varie de 654 mm à 755 mm pour une teneur en pouzzolane de 0% à 25% du poids de ciment ; de même, le temps d'écoulement T₅₀₀ augmente de 2.86 à 4.15 seconde, ces valeurs restent toujours inférieures à la valeur limitée par l'EFNARC. Ces résultats montrent que l'étalement diminue en fonction du taux de substitution par la pouzzolane et par conséquent le T₅₀₀ augmente. Cela est dû à la grande finesse de la pouzzolane et sa grande demande en eau.

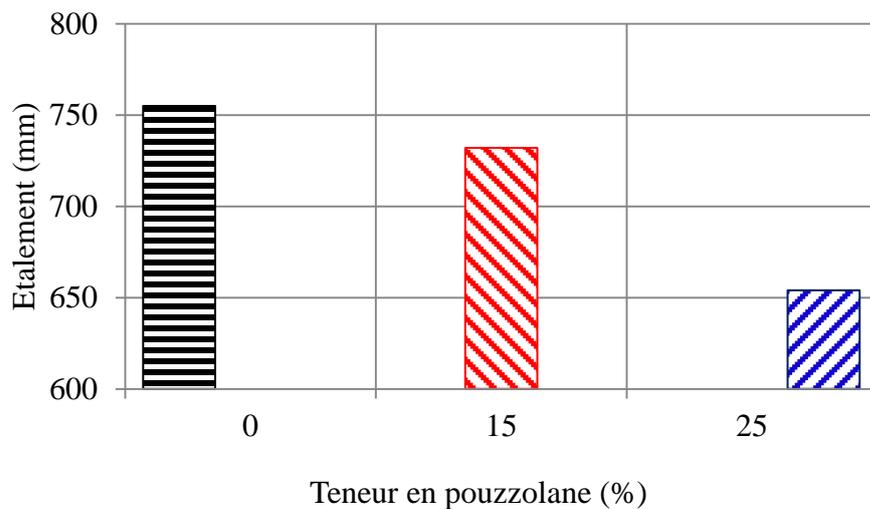


Figure.5.5: Étalement en fonction de la teneur en pouzzolane.

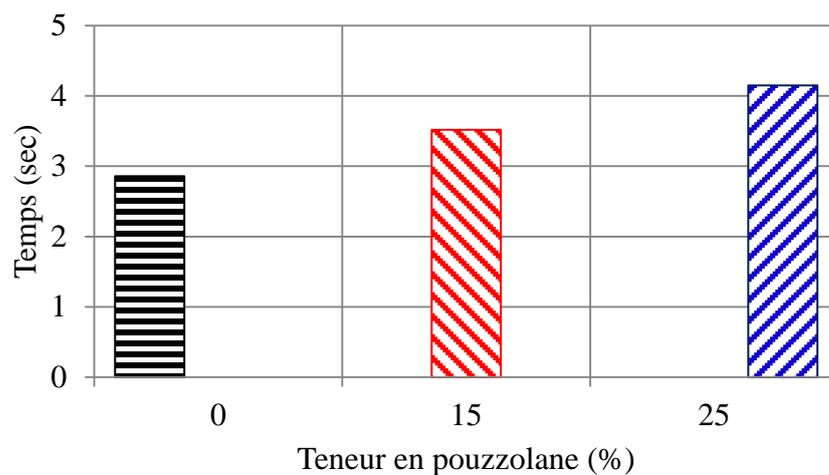


Figure 5.6: Temps d'écoulement T₅₀₀ en fonction de la teneur en pouzzolane.

b. Étalement à la couronne (J-Ring test)

L'essai d'étalement au J-ring permet de tester la capacité de passage, remplissage et ainsi le blocage du BAP [150]. La figure 5.7 présente l'étalement au J-Ring des BAP étudiés.

On observe que l'étalement au J-Ring obtenu pour les différentes compositions des BAP étudiés répond aux exigences de la norme (650 à 850 mm). Une chute d'ouvrabilité est nettement remarquée en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle. Comme il est représenté dans la figure 5.8, le temps d'écoulement T50J des BAP augmente en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle. En ce concerne la différence de hauteur Bj au J-Ring, reste toujours inférieure à la limite maximale de 10 mm (Figure 5.9).

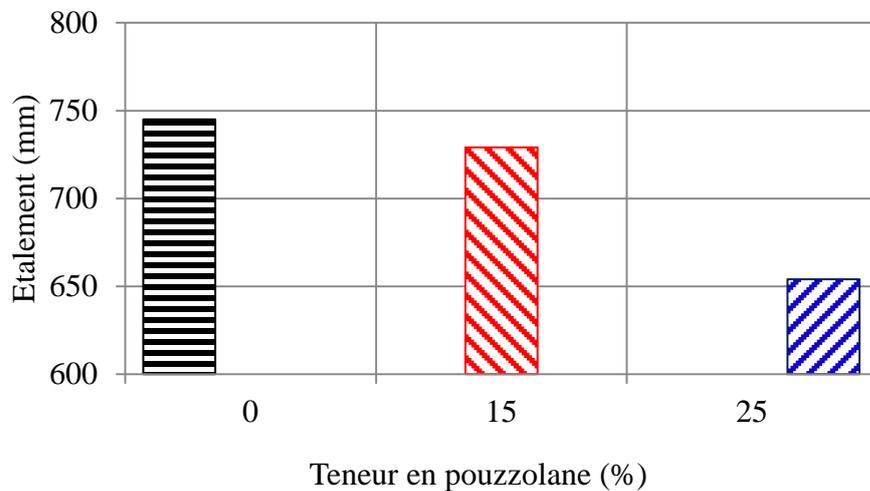


Figure 5.7 : Étalement au cône d'Abrams (J-Ring) des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

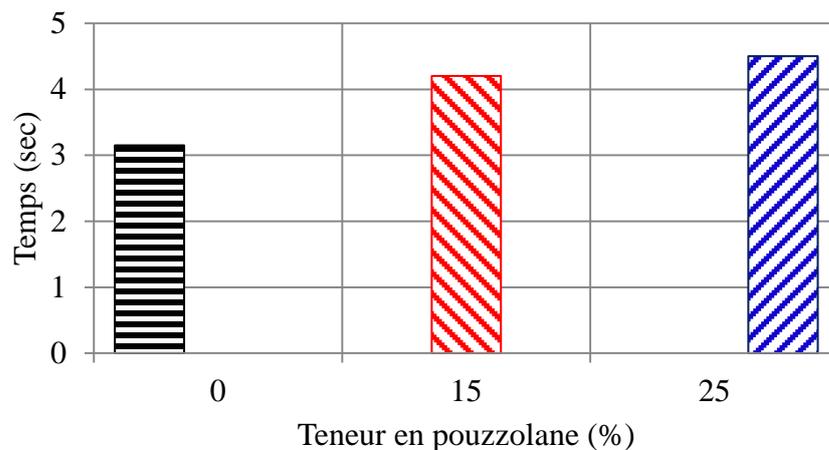


Figure 5.8 : Temps d'écoulement T50J des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

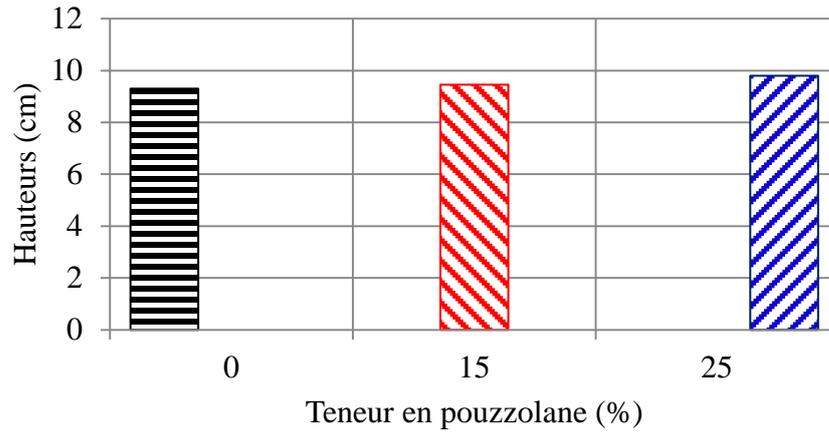


Figure 5.9: Différence de hauteurs Bj au J-Ring des différents BAP en fonction du dosage en pouzzolane naturelle (%).

c. Temps d'écoulement par l'essai d'Entonnoir en V (V-Funnel)

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction de la teneur en pouzzolane sont représentés sur la figure 5.10. Cet essai indique la capacité de remplissage du mélange. On constate une augmentation du temps de passage à travers l'entonnoir en fonction de la teneur en pouzzolane qui varie de 7,86 sec à 9,65 sec pour une teneur en pouzzolane de 0 à 25%. Des chercheurs [93], utilisé trois types d'adjuvants et ont rapporté que le temps d'écoulement au V-funnel est resté dans l'intervalle de 7sec et 11sec et cela pour les substitutions du ciment par la pouzzolane de 10 et 20%.

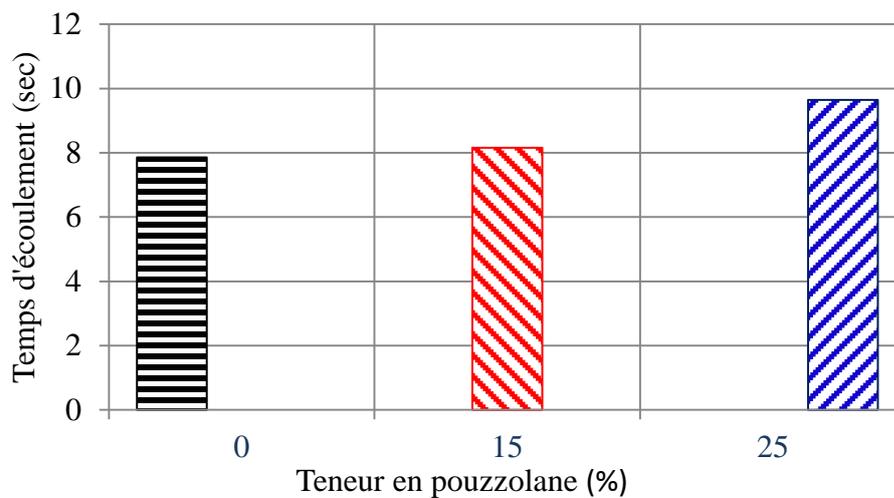


Figure 5.10: Temps V-Funnel en fonction de la teneur en pouzzolane.

d. Rapport H_2/H_1 de l'essai de la Boîte en L (L-Box)

L'essai de la boîte en L donne une bonne appréciation de la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. La figure 5.11 montre la variation du rapport H_2/H_1 en fonction du pourcentage de la pouzzolane, cette variation est de 0.81 à 0.88. L'EFNARC [141] spécifie une valeur de 0.8 - 1.0 pour l'essai L-box. Les temps T_{20} et T_{40} désigne le temps de passage du béton à la ligne de 20 cm et à celle de 40 cm respectivement. Ils permettent d'évaluer la vitesse d'écoulement et donnent ainsi une indication pour la capacité de remplissage.

La figure 5.12 montre la variation de temps d'écoulement T_{20} et T_{40} en fonction de la teneur en en pouzzolane. On note que les valeurs des deux temps d'écoulement augmentent en fonction de la teneur en pouzzolane et on observe une variation linéaire en fonction de cette teneur. Le temps d'écoulement T_{20} était inférieur à 1,5 seconde et le temps d'écoulement T_{40} était inférieur à 3,5 secondes.

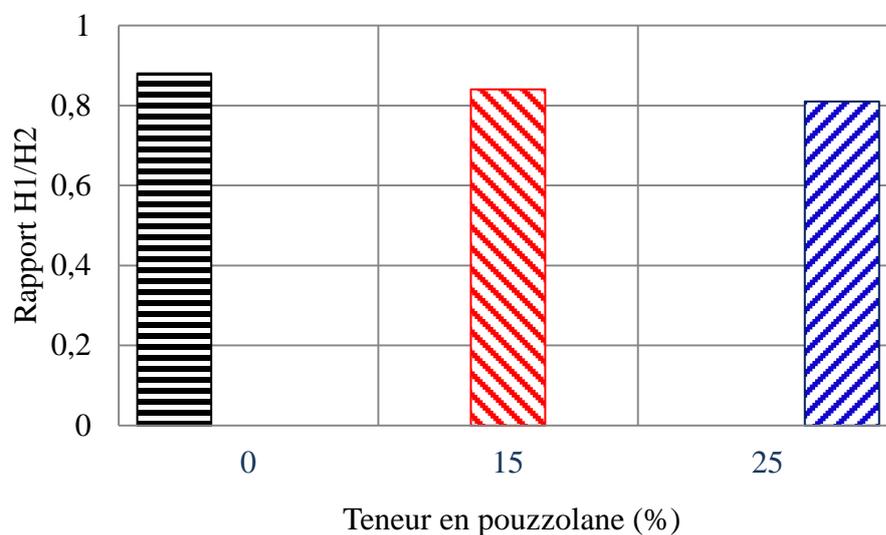


Figure 5.11: Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en Pouzzolane.

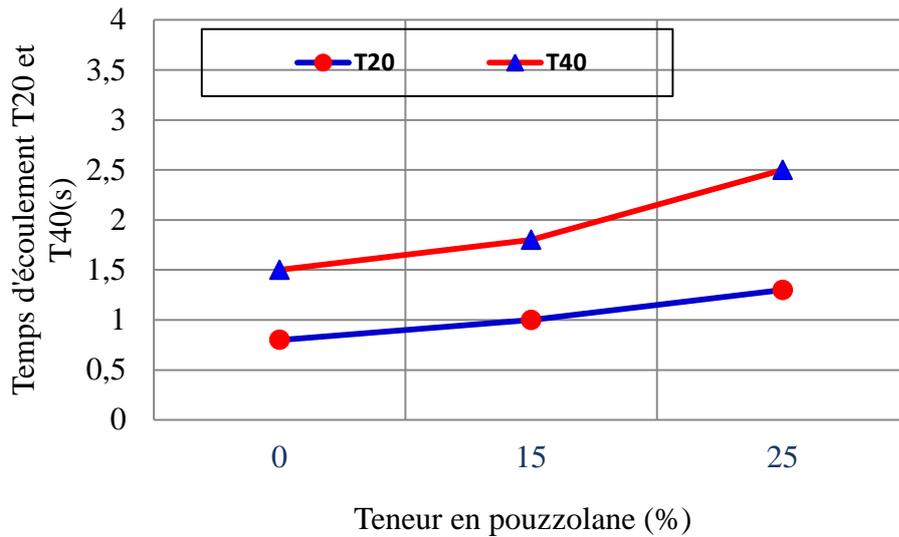


Figure 5.12: Temps d'écoulement T₂₀ et T₄₀ en fonction de la teneur en Pouzzolane.

e. Résistance à la ségrégation par tamisage

La figure 5.13 montre les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm en fonction de la teneur en pouzzolane. La laitance qui détermine le degré de ségrégation diminue en fonction de la teneur en pouzzolane et donne les valeurs de 9.22%, 6.15% et 4.11% pour des teneurs en pouzzolane de 0%, 15% et 25% respectivement. En effet ces mesures de stabilité au tamis sont inférieures aux seuils de 15% imposée par la norme l'EFNARC [141].

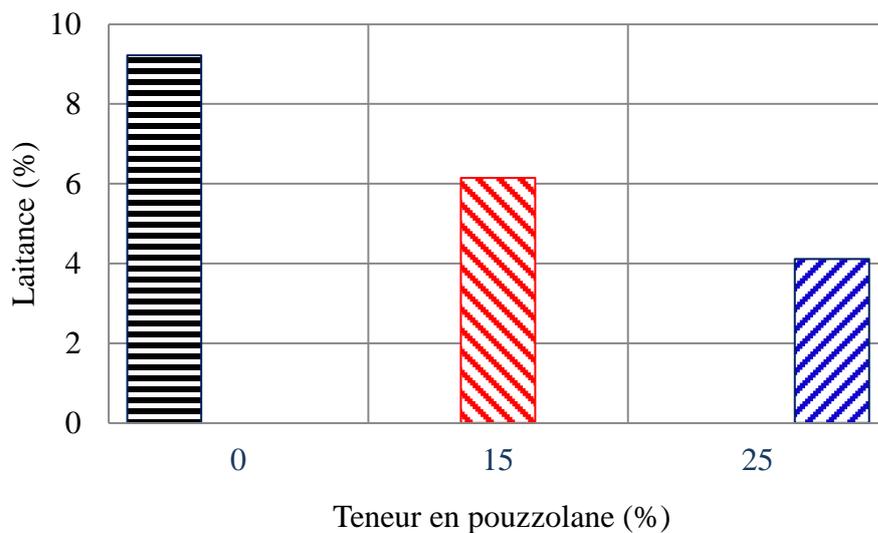


Figure 5.13: Résistance à la Ségrégation au Tamis en fonction de la teneur en pouzzolane.

5.4 Effet de la pouzzolane sur la rhéologie des BAP

5.4.1. Effet de la pouzzolane sur le seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule. La figure 5.14 montre la variation du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment par la pouzzolane pour les différentes compositions des BAP. L'incorporation de la pouzzolane diminue l'ouvrabilité du BAP et conduit à l'augmentation du seuil de cisaillement. Une augmentation de 9.2 Pa à 20.54 Pa et de 20.54 Pa à 25.14 Pa qui correspond à une augmentation de substitution de la pouzzolane de 0 à 15% et de 15% à 25% respectivement.

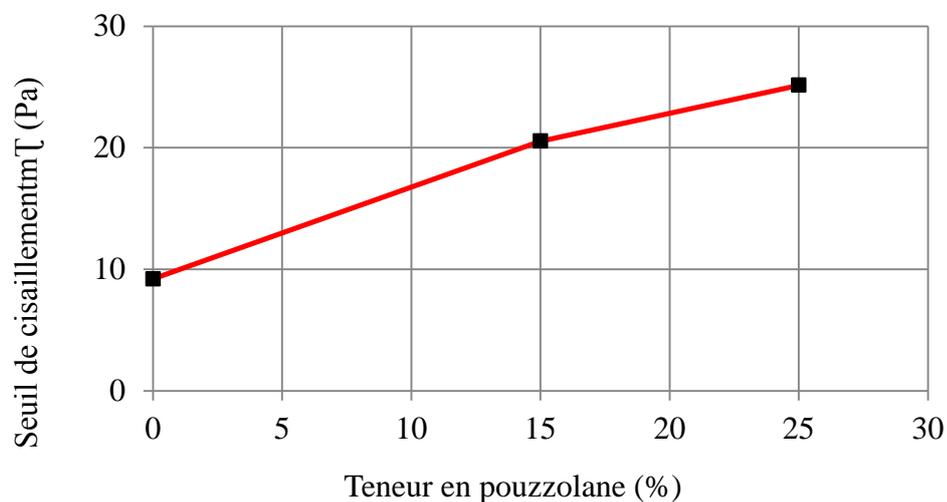


Figure 5.14: Seuil de cisaillement en fonction de la teneur en pouzzolane.

5.4.2. Effet de la pouzzolane sur la viscosité plastique

La figure 5.15 montre l'augmentation de la viscosité plastique du BAP en fonction de la teneur en pouzzolane. Elle varie de 6.26 à 9.93 (Pa.s) et de 9.93 à 11.55 (Pa.s) pour une variation de substitution de ciment par de la pouzzolane de 0 à 15% et de 15% à 25% respectivement. Cette croissance est de l'ordre de 58.6% et 84.5% qui décrit l'effet de la pouzzolane sur la viscosité plastique des BAP.

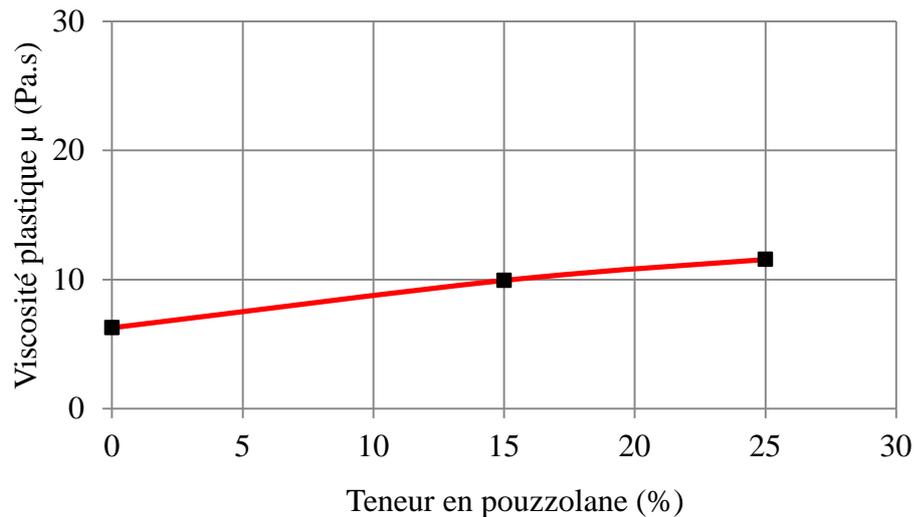


Figure 5.15: Viscosité plastique en fonction de la teneur en pouzzolane.

Les essais réalisés à l'état frais nous montrent l'effet de la pouzzolane sur la performance des BAP à l'état frais. Une augmentation du temps V_{funnel} , du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique et une diminution du diamètre d'étalement, du rapport L-box et de la laitance pour la ségrégation en fonction de la teneur en pouzzolane sont bien remarqués.

Cette baisse des propriétés rhéologiques en fonction de la teneur en pouzzolane, peut être expliquée par l'existence des vides et des canaux dans la structure de leurs grains, qui conduisent à l'adsorption de l'eau libre de mélange [65]. Une autre explication possible de ce phénomène est le grand volume de la pâte résultant de la substitution d'un ciment de forte densité par une addition minérale de densité plus faible [89].

Plusieurs chercheurs ont noté que la réduction de la maniabilité des mélanges de béton en raison de l'ajout de minéraux pouzzolaniques hautement réactifs est due à l'augmentation de la cohésion du béton en fonction de la forme et de la taille des particules, de la surface spécifique et de la réactivité du minéral pouzzolanique-adjuvants [151, 152].

Selon Hamdi [93], plus le dosage en pouzzolane augmente dans un BAP, l'étalement est fortement diminué jusqu'à la valeur de 49 cm, en raison de l'absorption d'une quantité élevée d'eau par la pouzzolane. Elle a constaté aussi que les bétons auto-plaçant étudiés à base de pouzzolane respectent le critère d'étalement pour des substitutions inférieures à

35%. Par contre pour une substitution de 40% et 50% de pouzzolane les bétons auto-plaçants ne respectent pas les recommandations.

La pouzzolane augmente la porosité de la pâte du béton et par conséquent son besoin en eau et cela peut expliquer la chute de l'ouvrabilité du BAP à base de la pouzzolane naturelle [150]. Debbih [153], a trouvé que les valeurs de T40 sont vérifiées pour les deux BAP avec 15% du laitier) et avec 15% de la pouzzolane naturelle mais pas pour le BAP sans ajout où la valeur du T40 dépasse les 3,50 secondes.

La Pouzzolane naturelle a un comportement rhéologique similaire à celui de la fumée silice en raison de l'augmentation des interactions entre les particules fines [89]. Certains chercheurs [90], ont confirmé que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la fumée de silice ou de la pouzzolane naturelle. Boukhelkhal et al. [154], ont remarqués que la pouzzolane rend le BAP plus visqueux par rapport au BAP fabriqué avec du calcaire ou du laitier granulé. Bilgil et al. [155], ont trouvé que lorsque le seuil de cisaillement augmente la viscosité plastique augmente et inversement, ceci est le comportement attendu des fluides Binghamiens et confirme la supposition qui stipule que le béton fluide agit comme un fluide non-Newtonien. Boukendakdji et al. [156], ont remarqué que la substitution du ciment par le laitier est avérée être très bénéfique pour le béton auto-plaçant. Une amélioration de la maniabilité a été observée en utilisant jusqu'à 20% de laitier de hauts fourneaux. Hallal et al. [105] ont confirmé que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la fumée de silice ou de la pouzzolane naturelle.

Belaidi et al. [157] ont remarqué que l'utilisation de la pouzzolane naturelle semblait être responsable de l'augmentation du temps d'écoulement en V-funnel avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle. Toutefois, il n'y avait pas d'écoulement pour des teneurs de 20% et 25% de pouzzolane naturelle avec un dosage de 0,9% de superplastifiant, ce qui montre la nécessité d'un pourcentage élevé de superplastifiant.

Hallal et al. [90], ont confirmé que la viscosité augmente rapidement en fonction du taux de substitution de la fumée de silice ou de la pouzzolane naturelle. Les exigences du code européen sont satisfaites pour les bétons autoplaçant contenant 10%, 20% et 30% pouzzolane naturelle sur les propriétés rhéologiques [158].

La figure 5.16 illustre la corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique en fonction d'étalement, et qui confirme les résultats des essais classiques. Les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0.73 et 0,75 signifiant une bonne relation entre ces paramètres rhéologiques et l'étalement des BAP substitués par la pouzzolane.

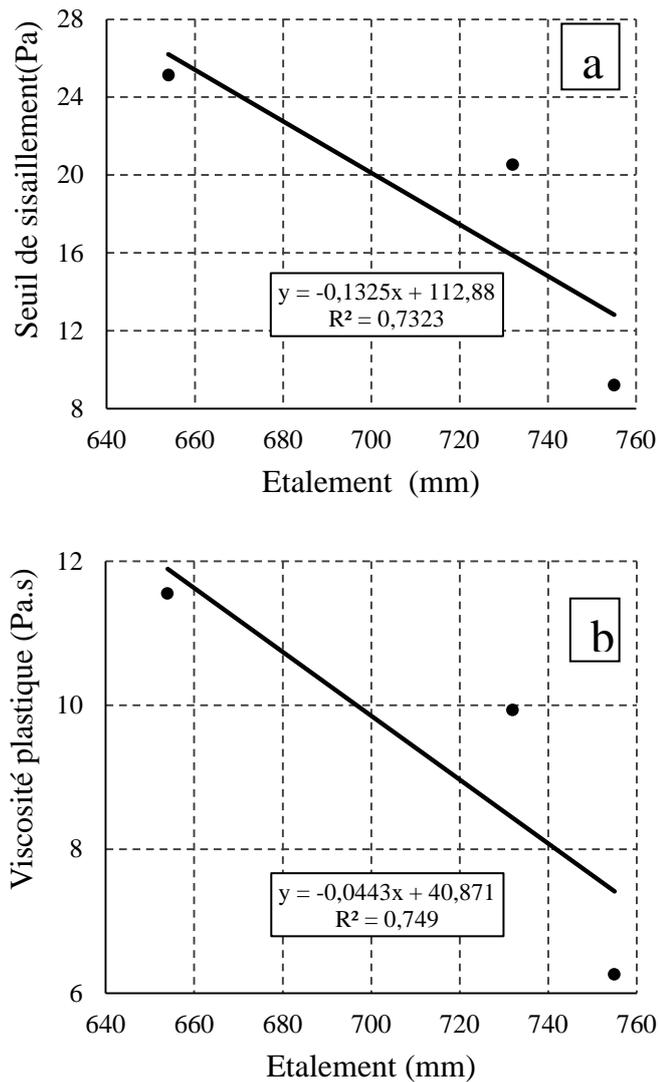


Figure 5.16: Corrélation entre le seuil de cisaillement (a), la viscosité plastique et l'étalement (b).

5.5 Effet de climat chaud sur le BAP à base de pouzzolane à l'état durci

5.5.1. La résistance mécanique

Les résultats de la résistance en compression des bétons en fonction de la teneur en pouzzolane et la durée de cure humide initiale (0,1, 3, 7, 14 et 28 jours) suivie d'une cure dans un climat chaud jusqu'aux 90 jours sont récapitulés dans le tableau 5.8 et illustrés sur les figures 5.17 et 5.18.

Tableau 5.8: Effet de la durée de cure humide initiale sur la résistance en compression

Durée de cure (jour)	Résistance à 28 jours (MPa)						Résistance à 90 jours (MPa)					
	0	1	3	7	14	28	0	1	3	7	14	28
SCC-0	35,6	38,9	39,3	40,3	42,8	43,0	36,1	39,8	40,5	41,5	43,94	44,9
BAP-15	34,1	34,3	35,1	38,8	39,14	42,5	34,3	35,0	36,7	39,5	41,5	45,8
BAP-25	30,8	33,1	34,6	35,1	38,2	39,9	31,8	33,8	35,8	36,3	38,8	42,8

Les figure 5.17et 5.18montrent l'évolution de la résistance à la compression à 28 et 90 jours des BAP à base de pouzzolane en fonction de la durée de cure humide initiale (T=20°C, RH=100%).

Les BAP exposés directement au climat chaud sans subir aucune cure humide initiale donnent les plus faibles valeurs en compression. Une des principales observations est que, plus-la durée de cure dans l'eau est longue plus les résistances sont élevées.

A l'âge de 28 jours (Figure 5.17), une augmentation de résistance de 20,79%, 24,63% et 24,03% correspond aux BAP (0,15 et 25) respectivement est remarquée entre une cure humide initiale de 0 jours et 28 jours. A l'âge de 90 jours (Figure 5.18), cette augmentation de résistance est de 24,38%, 33,53% et 34,59% correspond aux BAP (0,15 et 25) respectivement. Ces résultats montrent l'effet positif et la nécessité de la cure humide initiale dans un climat chaud. La cure humide empêche l'hydratation rapide et l'évaporation de l'eau de gâchage.

Les figures 5.19, 5.20 et 5.21 montrent l'effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance à la compression des BAP dans ces conditions de cure. A l'âge de 28 jours le BAP-0 donne des valeurs plus grandes que celles des BAP-15 et BAP-25. Cependant, entre 28 et 90 jours un gain de résistance est bien remarqué pour le BAP-15 qui augmente de 0.2 MPa à 3.3 MPa pour une cure humide de 0 à 28 jours et qui donne les valeurs de la résistance à la compression les plus élevées.

Les valeurs de résistance en compression de 28 à 90 jours varient de 43 à 44.9, 42.5 à 45.8 et de 39.90 à 42.8 MPa dont la teneur en pouzzolane est de 0%, 15% et 25%, respectivement. Cette évolution de résistance nous renseigne sur le niveau de résistance de BAP à long terme et permet d'évaluer le gain de résistance après l'arrêt de cure humide et en présence de la pouzzolane dans un climat chaud qui n'a aucun effet négatif sur la réaction de la pouzzolane (Figure 5.22). Cette augmentation de résistance est conforme à la norme ASTM 618-03[159], qui décrit la pouzzolane comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux et qui intrinsèquement, possède peu ou pas de valeur hydraulique, néanmoins lors de son broyage poussé en présence d'humidité et à des températures ordinaires elle peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés possédant des propriétés hydrauliques. Autrement dit, une pouzzolane est un matériau capable de fixer la chaux à la température ambiante et de former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation.

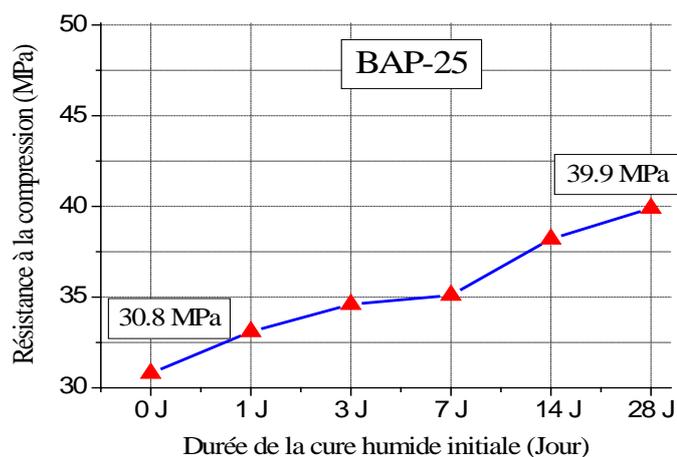
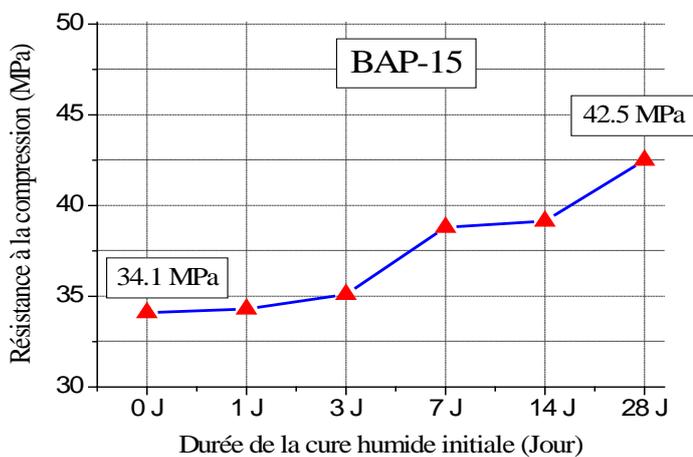
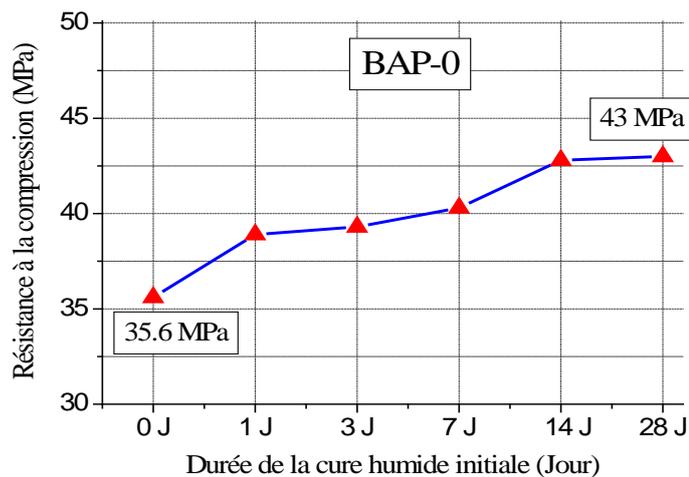


Figure 5.17: Effet de la durée de cure humide initiale sur la résistance en compression à 28 jours.

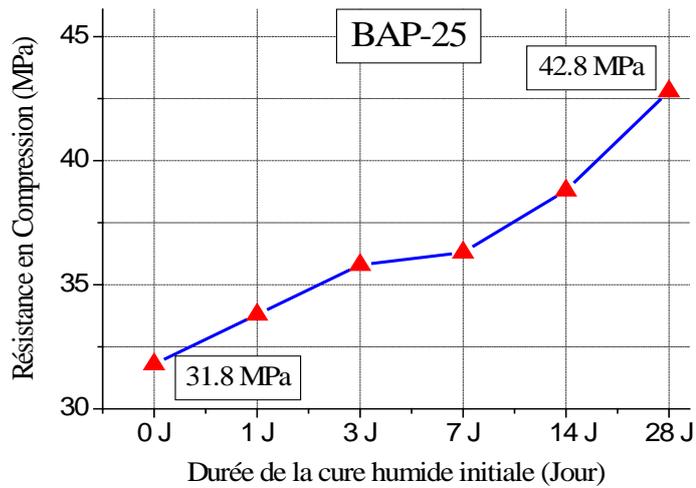
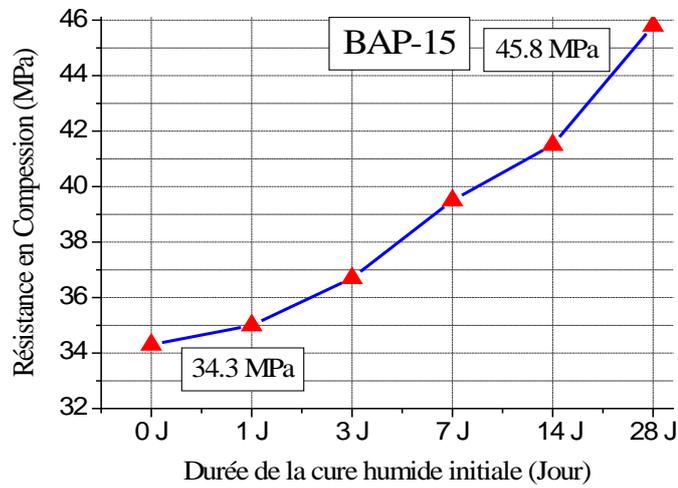
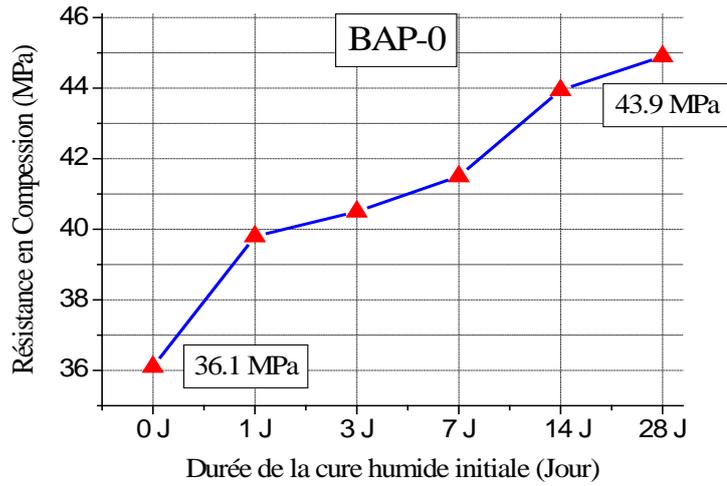


Figure 5.18: Effet de la durée de cure humide initiale sur la résistance en compression à 90 jours.

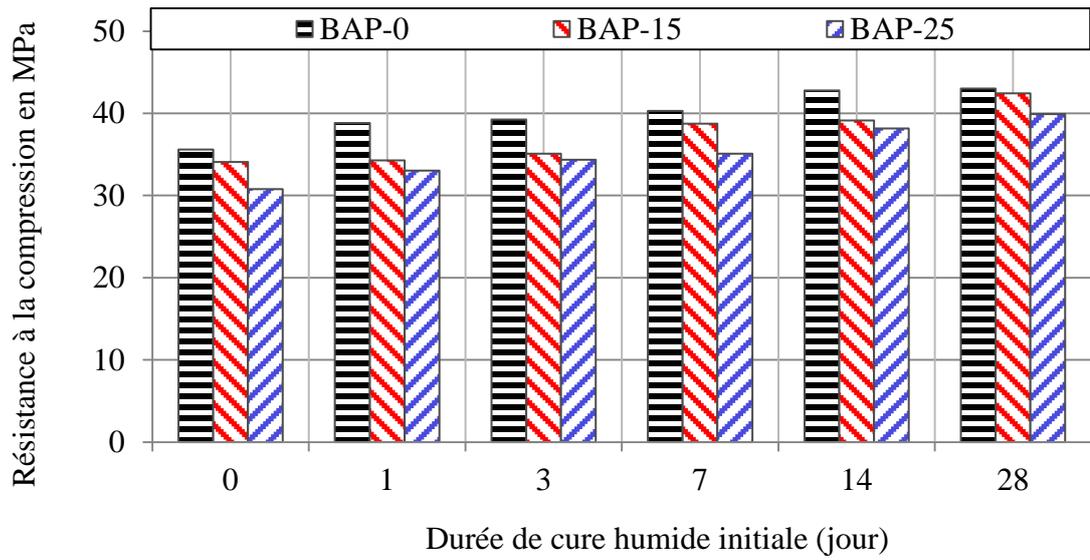


Figure 5.19: Effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance en compression à 28 jours.

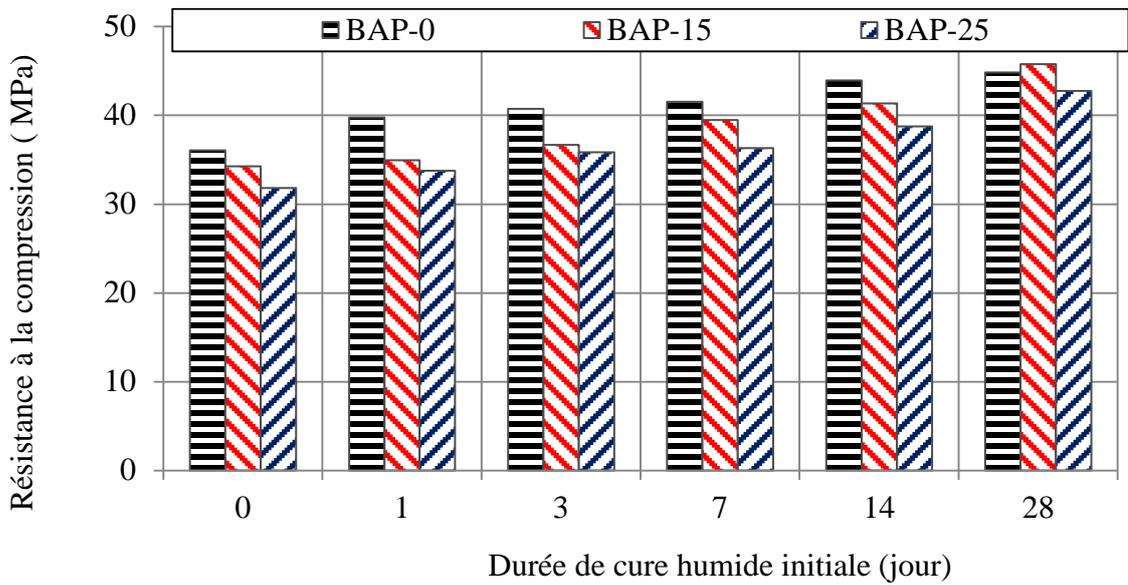


Figure 5.20: Effet de la teneur en pouzzolane sur la résistance en compression à 90 jours.

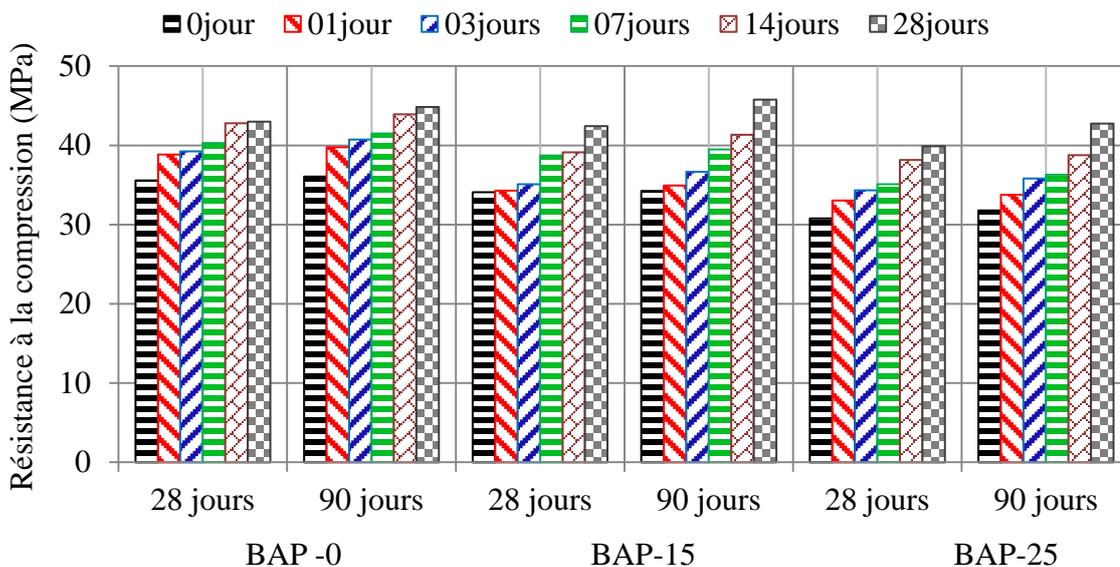


Figure 5.21: Effet de la teneur en pouzzolane sur l'évolution de la résistance en compression à 28 et 90 jours.

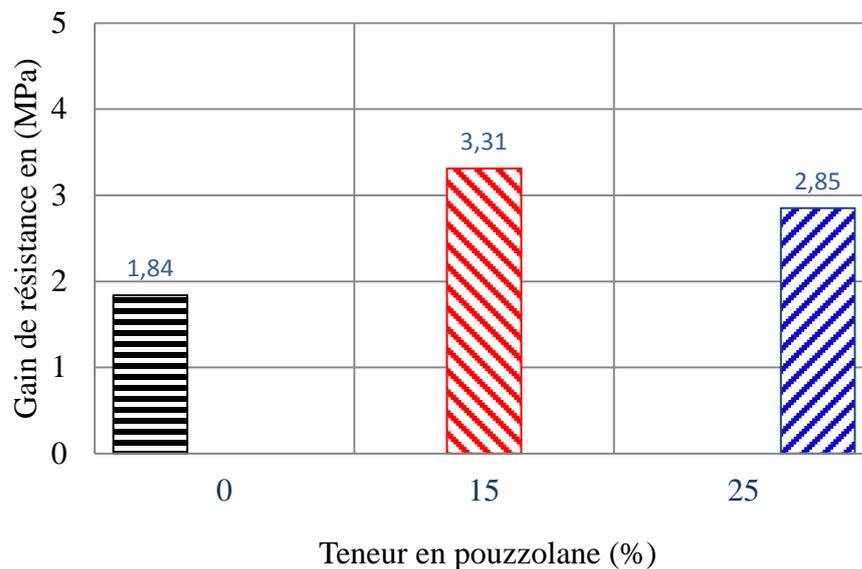


Figure 5.22: Gain de résistance des trois BAP entre 28 et 90 jours pour une cure humide initiale de 28 jours.

Les résultats des recherches élaborées dans ce sens par Gallucci et al. [126], ont montré que, plus la température est élevée, plus le développement de la résistance à jeune âge est rapide. Après trois jours d'hydratation, la résistance du béton à 20°C rattrape celle des bétons à 40 et 60°C. Après 28 jours, elle les dépasse, alors que le développement du béton à 60°C semble s'arrêter. Après un an, la résistance à 5°C rattrape celle à 20°C. La résistance à 60°C est de 25% inférieure.

L'activation pouzzolanique augmente avec l'âge et ne peut être efficace qu'à partir de 28 jours. Ceci montre que l'activité des pouzzolanes naturelles est très lente. Cet effet est due au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant un deuxième C-S-H supplémentaire, et augmente de cette manière avec le dosage de l'ajout pouzzolanique (Ghrici et al). [160]. En effet il y a plusieurs paramètres influençant cette activité pouzzolanique comme la nature des phases actives et leurs proportions, la finesse de la pouzzolane, le rapport chaux/ pouzzolane dans le mélange et la durée et la température de cure.

Le durcissement prolongé à l'eau joue un rôle efficace sur l'activation pouzzolanique car la pouzzolane naturelle réagit avec l'hydroxyde de calcium provenant de l'hydratation du ciment pour former un CSH secondaire. D'autres chercheurs ont également signalé que la résistance à la compression du BAP avec le laitier et la pouzzolane naturelle est comparable ou supérieure à celle du BAP de référence après 28 jours [85, 151, 161, 162].

Senhadji et al. [163], ont observé que la substitution de 20% de ciment Portland ordinaire par des pouzzolanes naturelles dans un mortier augmentait légèrement la résistance à la compression à 360 jours. Cela pourrait s'expliquer par la lenteur des réactions pouzzolaniques entre les particules vitreuses de la pouzzolane naturelle et du C – H parce que le C – H doit d'abord être produit à la suite de l'hydratation du ciment Portland. Belhadj et al. [164], ont constaté que l'ajout de pouzzolane (12,5% en poids de ciment) augmentait la résistance à la compression du mortier d'environ 30%.

Le durcissement dans un climat chaud donne un développement de résistance plus élevé au jeune âge. Ahmed et al. [165], ont remarqué que l'environnement chaud et sec avait un effet évident sur la diminution de la résistance du béton par rapport au durcissement à l'eau.

Cependant, les différences sont insignifiantes. Ils ont rapporté que la résistance du béton durci à 20 ° C pouvait atteindre celle d'un béton durci à 40 ° C après trois jours. Ahcene et al. [166], ont observé que, dans le cas du béton maintenu dans l'eau, l'augmentation de la résistance à la compression continue à mesure que la durée d'immersion augmente et que l'addition de pouzzolane permet de gagner en résistance à la compression.

Kim et al. [125], ont noté que la résistance à la compression entre 1 et 7 jours augmentait avec la température de durcissement. Mais le taux d'augmentation de la résistance à 28 jours des bétons durcis à 23 ° C est supérieur à ceux durcis à 35 °C. Boukhelkhal et al. [167], ont noté qu'un durcissement à l'eau de 7 jours était nécessaire pour obtenir une bonne résistance mécanique du mortier autoplaçant.

Par temps chaud, le béton doit être durci plus longtemps que les conditions météorologiques normales afin d'obtenir une résistance et une durabilité acceptables [124]. L'augmentation de la durée de durcissement à l'eau augmente la résistance à la compression alors que le durcissement à l'air diminue la résistance à la compression [168]. Après 28, 90 et 360 jours de mûrissement, les BAP contenant de la pouzzolane naturelle présentent des performances très similaires à celles obtenues avec les BAP contenant des cendres volantes et bien meilleures que celles obtenues avec des BAP formulés avec des fines calcaires [169].

Yahiaoui et al. [85], ont rapporté l'effet positif de l'utilisation de laitier de haut fourneau pour améliorer les performances du BAP sous un climat chaud. Ezziane et al. [170], ont remarqué que l'utilisation de la pouzzolane naturelle est bénéfique par temps chaud sans risque considérable de la résistance ultime.

Selon Belhadj et al. [164], une augmentation de 30% de la résistance du mortier en présence de la pouzzolane avec l'adjuvant a été remarquée. D'après Kazi et al. [95], les BAP à base de pouzzolane naturelle et les BAP à base de cendres volantes présentent une adhérence presque semblable à celle du béton vibré, malgré que le comportement de BAP à long terme semble être meilleur que celui du béton vibré.

L'effet de la pouzzolane sur les valeurs des résistances en compression des mortiers dans lesquels elle a été substituée partiellement au ciment pour les mélanges à base de 20, 25 et

30% de pouzzolane est remarquable à partir de 60 jours pour les mêmes raisons relatives à la réaction pouzzolanique [171]. L'humidité mesurée était de 65 à 75%, cette valeur d'humidité influe sur l'évolution des résistances caractéristiques des bétons. L'étude de Bakir et al. [172], sur mortier a montré que le climat sec influe négativement sur la résistance caractéristique. Ceci est dû à l'évaporation rapide d'une quantité d'eau des couches superficielles, ce qui entraîne des microfissures dans la matrice cimentaire surtout en présence d'une température élevée. Alors que dans le climat humide l'évaporation est limitée et la procédure d'hydratation se poursuit d'une manière continue. Ceci veut dire que l'humidité joue un rôle primordial dans le développement de la résistance à la compression, même en présence d'une température assez élevée.

5.5.2 Essais non destructifs

Les valeurs des vitesses des ondes ultrasoniques et indices de rebondissement en fonction de la teneur en pouzzolane et la durée de cure humide initiale (0,1, 3, 7,14 et 28 jours) suivie d'une cure sous climat chaud jusqu'aux 90 jours sont récapitulés dans le tableau 5.9. Ces valeurs confirment les résultats de la résistance à la compression obtenus par les essais destructifs. Les figures 5.23 et 5.24 montrent l'effet positif de la cure humide initiale pendant le climat chaud qui donne les meilleures valeurs en termes de vitesses des ondes et indices de rebondissement. Pour une variation de cure humide initiale de 0 jour à 28 jours, les valeurs des vitesses des ondes varient de 3046 à 3231, de 3178 à 3429 et de 2669 à 3154 m/s. Les valeurs des indices de rebondissement varient de 38 à 43, de 37 à 43 et de 35.5 à 41 dont la teneur en pouzzolane est de 0, 15 et 25% respectivement. L'effet de la teneur en pouzzolane est présenté sur les figures 5.25 et 5.26. Le BAP-15 donne des meilleures valeurs en termes de vitesse ultrasonique et indice de rebondissement après une cure humide de 28 jours. La figure 5.27 montre la corrélation entre la résistance en compression et l'indice de rebondissement, cette corrélation montre qu'on peut estimer la résistance en compression des BAP par des essais non destructifs. Les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0.85, 0.96 et 0.94 signifiant une forte corrélation entre ces deux derniers pour les BAP substitués par la pouzzolane.

Les BAP correspondants à 0 jour de cure humide initiale ont donné les valeurs les plus faibles de vitesse d'impulsion. Ceci est attribué à l'hydratation précoce accélérée qui forme une microstructure poreuse car le C-S-H formé n'est pas uniformément réparti, ce qui entraîne une dégradation de la vitesse d'impulsion [173,174]. Nasir et al. [175], ont étudié l'effet de la température de coulage sur la résistance et la vitesse d'impulsion du béton en présence d'additifs minéraux, préparés et durcis par temps chaud. Une bonne corrélation a été observée entre la résistance et la vitesse de propagation du béton. Hisham et al. [176], ont observé qu'il y avait un effet négligeable du mode de cure dans des conditions de temps chaud et sec sur la vitesse de propagation du béton léger à hautes performances au jeune âge.

Tableau 5.9: Vitesses des ondes ultrasoniques et indices de rebondissement

Cure humide en jour	Vitesse des ondes ultrasoniques (m/s)			Indice de Rebondissement		
	BAP-0	BAP-15	BAP-25	BAP-0	BAP-15	BAP-25
0	3046	3178	2670	38.00	37.00	35.50
01	3111	3252	2881	38.50	37.500	36.50
03	3132	3265	2982	39.00	38.50	37.00
07	3145	3283	3014	41.00	41.00	38.00
14	3193	3368	3043	42.00	41.00	38.00
28	3231	3430	3155	43.00	43.00	41.00

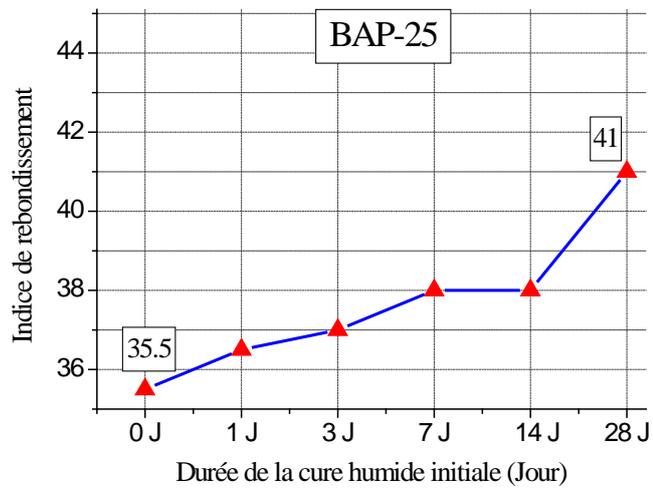
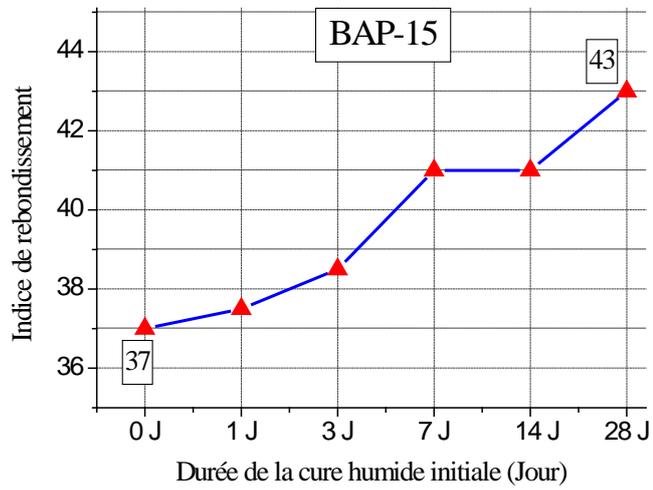
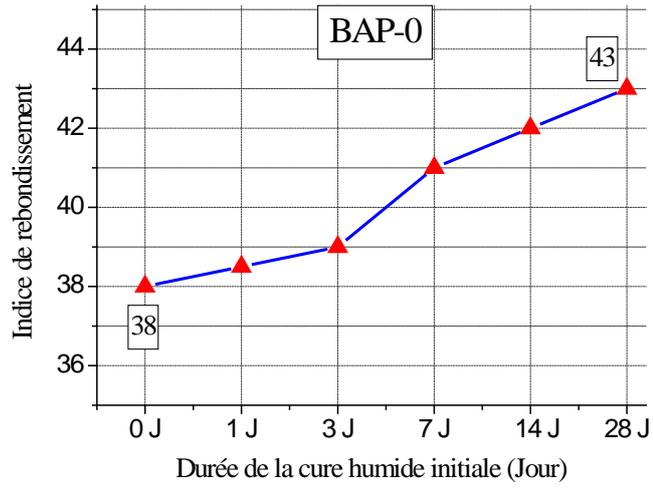


Figure 5.23 : Effets de la durée de cure humide initiale sur l'indice de rebondissement sclérométrique à 90 jours.

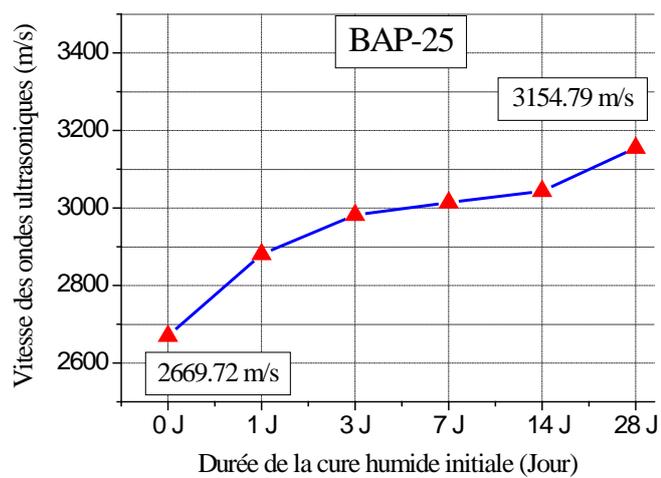
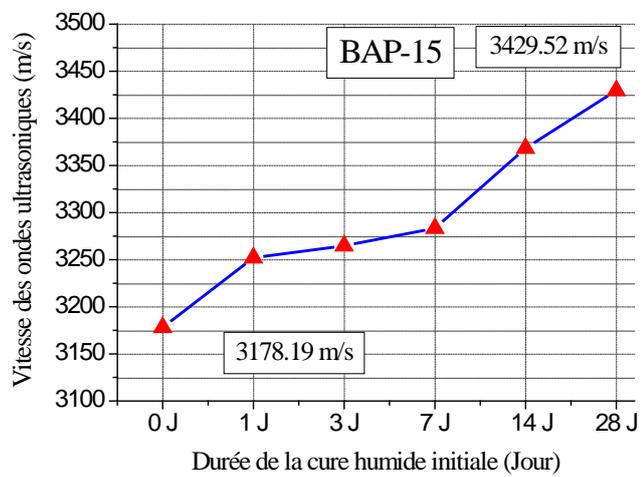
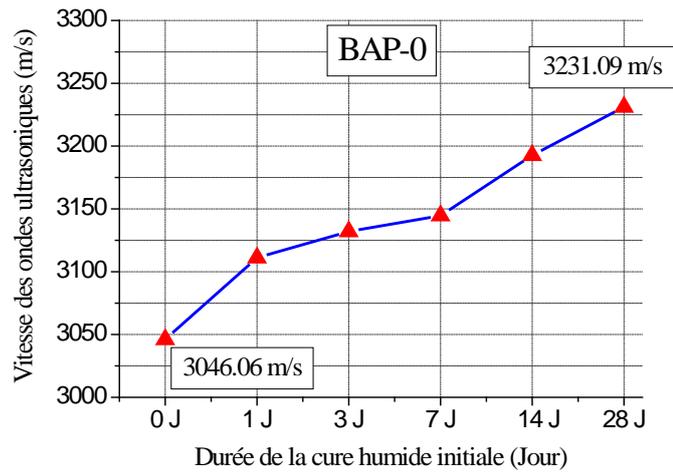


Figure 5.24: Effets de la durée de cure humide initiale sur la vitesse des ondes ultrasoniques à 90 jours.

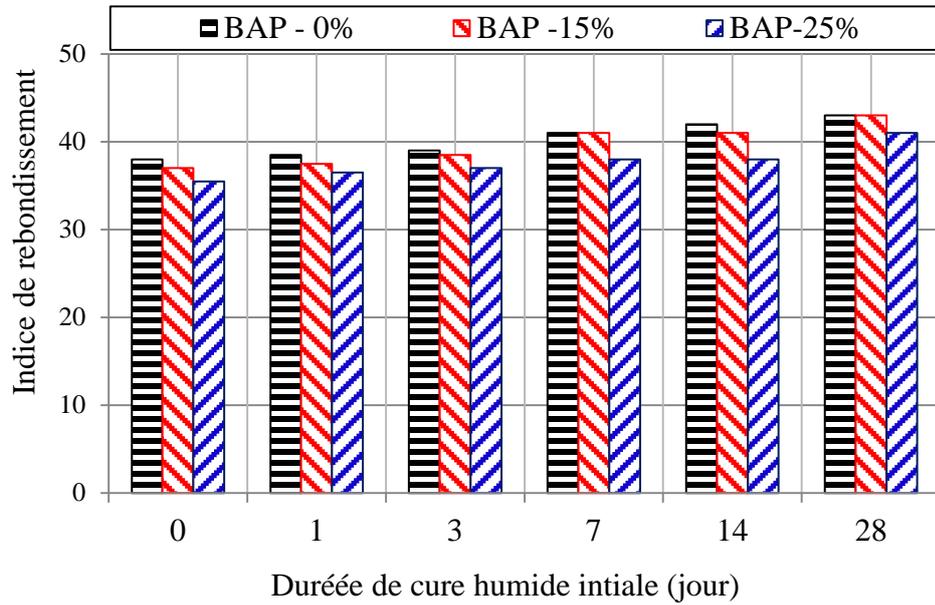


Figure 5.25: Effets de la teneur en pouzzolane sur l'indice de rebondissement sclérométrique à 90 jours.

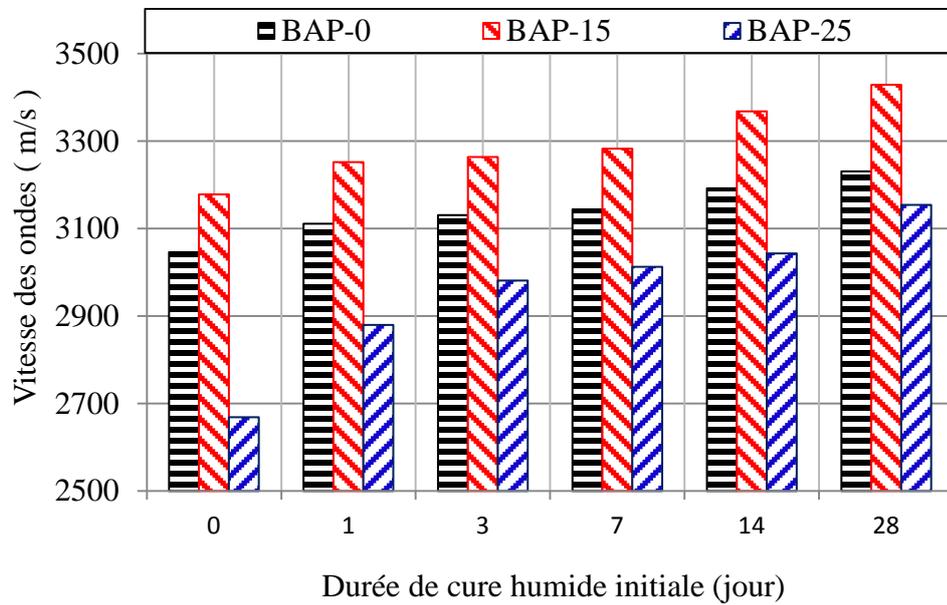
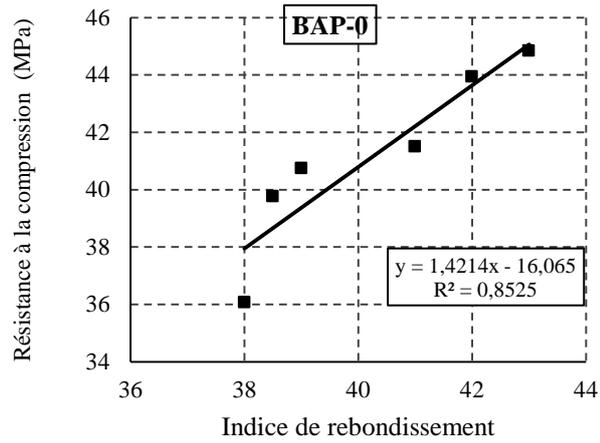


Figure 5.26: Effets de la teneur en pouzzolane sur la vitesse des ondes ultrasoniques à 90 jours des BAP à base de pouzzolane.



2

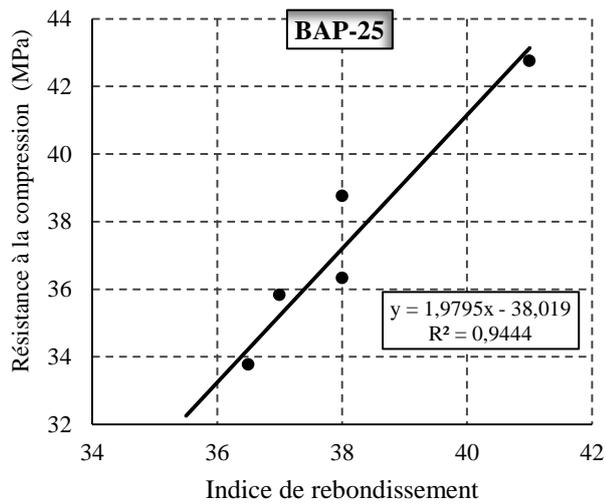
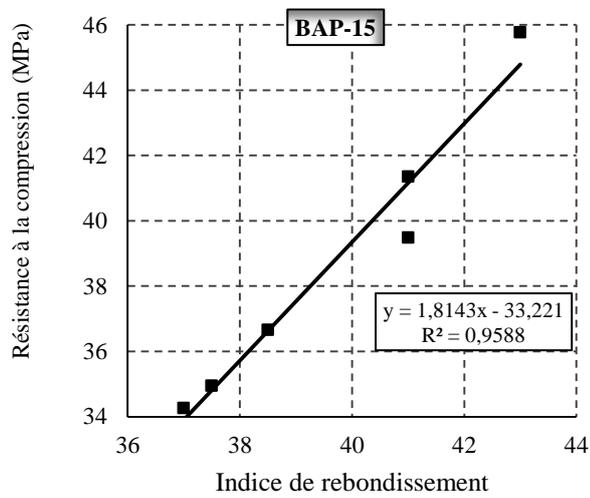


Figure 5.27: Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement.

5.5.3 Porosité ouverte accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau traduit le volume de vides ouvert sur le volume total du béton. Cette grandeur informe sur la capacité du matériau à se laisser pénétrer par des agents agressifs (porosité ouverte), elle est exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation:

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100 \dots\dots\dots (5.1)$$

ε: Porosité ouverte accessible à l'eau

M_{eau} : La masse du spécimen immergé dans l'eau, M_{air} : la masse du spécimen pesé dans l'air,

M_{sec} : La masse du spécimen sec.

Les résultats de la porosité ouverte sont illustrés dans le tableau 5.10.

Tableau 5.10: Valeurs de la porosité accessible à l'eau des BAP à 90 jours

Cure humide en jour	0	1	3	7	14	28
BAP-0	20.74	19.59	19.34	17.14	16.69	15.91
BAP-15	20.33	19.84	19.01	16.49	15.52	14.29
BAP-25	21.94	21.17	20.48	19.75	18.83	17.77

La figure 5.28 illustre les résultats de la porosité ouverte à l'âge de 90 jours en fonction de la durée de cure humide et la teneur en pouzzolane. Nous constatons que lorsque la durée de cure initiale augmente de 0 à 28 jours, la porosité diminue de 23.28%, de 29.71% et de 19% pour une teneur en Pouzzolane de 0, 15 et 25% respectivement. Ces valeurs nous montrent que la porosité diminue avec l'augmentation de la durée de cure humide initiale. L'effet de la teneur en pouzzolane est montré sur la figure 5.29. Le BAP-15 présente une porosité plus faible que celle du BAP-0. Cela est peut-être expliqué au raffinement des pores capillaires de la matrice cimentaire du béton durci. Les bétons qui n'ont reçu aucune cure humide présentent la plus mauvaise performance en termes de porosité. Les valeurs de la porosité accessible à l'eau présentent une bonne corrélation avec la résistance à la compression (Figure 5.30).

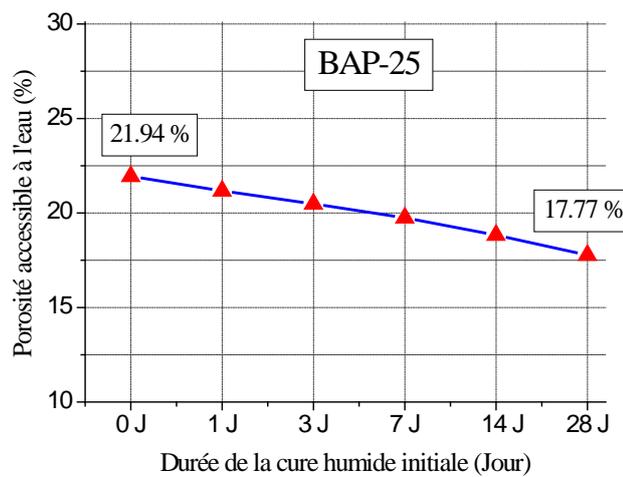
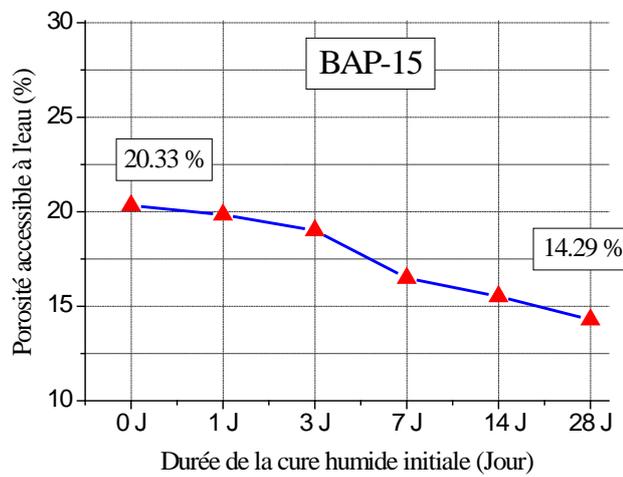
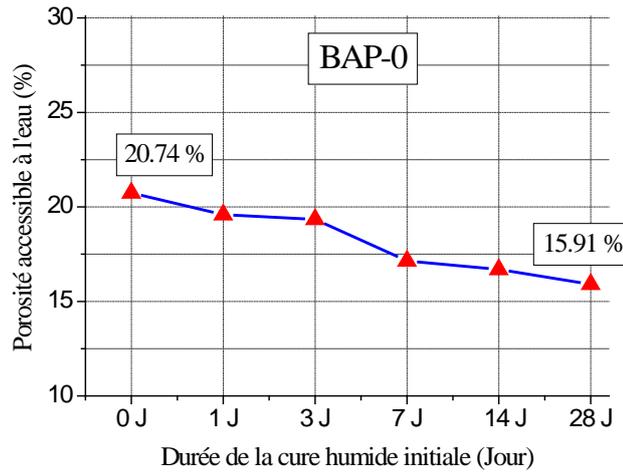


Figure 5.28: Effet de la durée de cure humide initiale sur la Porosité accessible à l'eau à 90 jours.

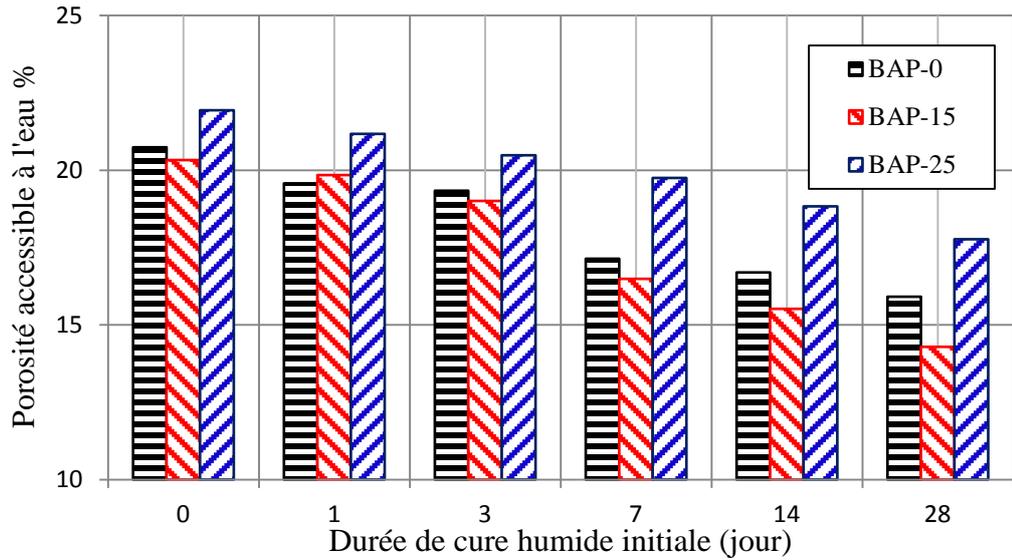


Figure 5.29: Effet de la teneur en pouzzolane sur la Porosité accessible à l'eau à 90 jours.

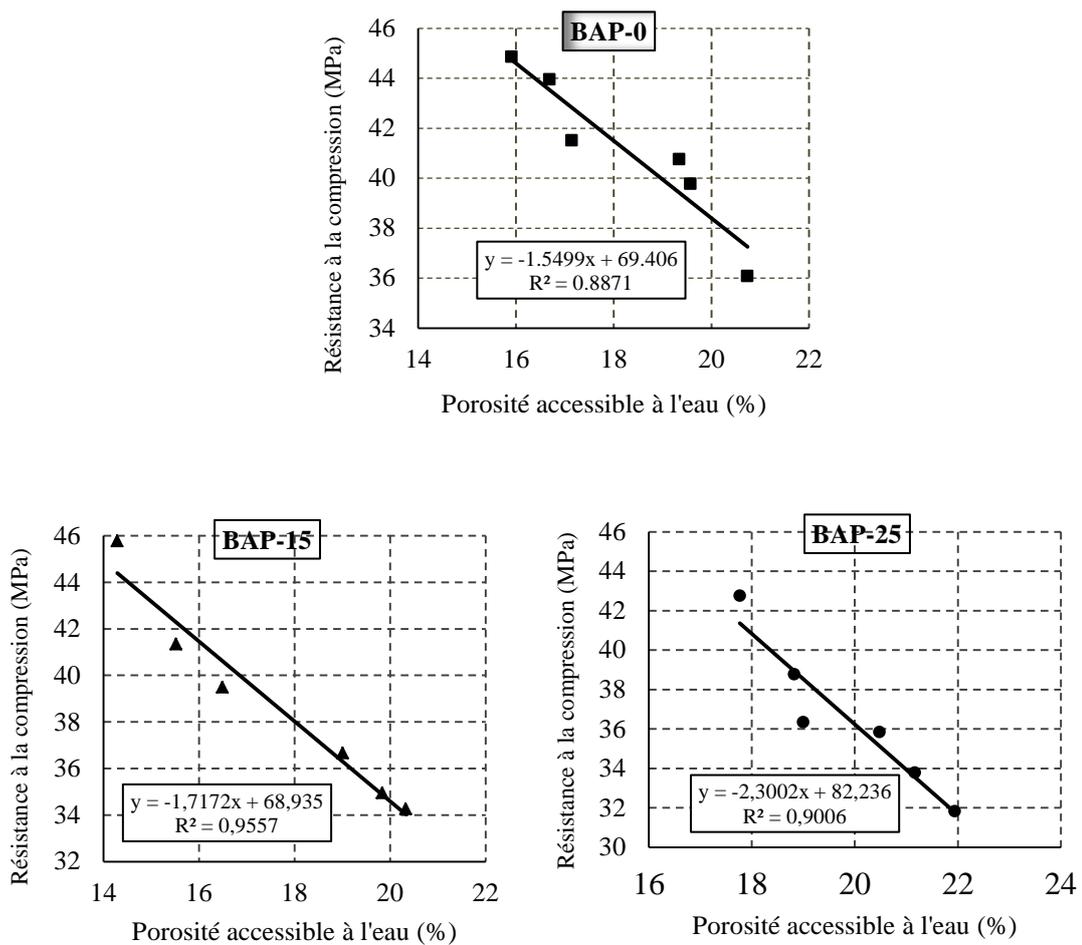


Figure 5.30: Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau.

Gallucci et al. [126], ont étudié l'influence de la température sur le développement microstructural des bétons par mesure de la porosité capillaire par analyse d'image, ils ont constaté que sur le long terme, la cure en haute température a pour effet de générer un réseau poreux plus large. A très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée. Ceci est lié aux faibles taux d'hydratation mesurés. Une inversion des tendances avec des porosités plus fortes à haute température a été observée. Ramezani pour et Malhotra [130], ont constaté que les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage montrent la plus mauvaise performance en termes de développement de résistance, de porosité et de résistance à la pénétration des ions du chlore.

Alsayed. [176], a étudié l'effet des conditions de cure sur la résistance, la porosité et l'absorptivité du béton dans un climat chaud et sec, les résultats ont montré que lorsque les conditions climatiques défavorables prévalaient, la cure du béton avec arrosage deux fois par jour avec de l'eau augmentait la résistance à la compression à 360 jours à 42% par rapport à un béton non arrosé. La porosité et l'absorption d'eau ont aussi diminué de plus de 22%. La formation rapide d'hydrates due à la température élevée provoque une grande porosité et une perte de résistance ultime, comme le rapportent plusieurs auteurs. La substitution du ciment à la pouzzolane naturelle améliore ce phénomène [170].

5.5.4 Absorption capillaire

Le béton est en effet un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition (rapport E/L_{Equiv} , additions minérales, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type des pores, des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire. Le liquide monte d'autant plus haut que le diamètre du capillaire est petit. Les pores capillaires ouverts sur le milieu extérieur vont donc conduire, dans certaines conditions (principalement d'humidité), à laisser s'infiltrer par succion des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie d'une construction soumise à ces attaques. Au cours de l'essai d'absorption, seule la quantité d'eau globale ayant pénétré dans l'échantillon est mesurée et non la hauteur maximale atteinte par le liquide.

L'absorption capillaire a été mesurée en plusieurs échéances (1min, 5min, 10 min, 20min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h, 12h, 1jour et ensuite chaque jour jusqu'à 8 jours. Le tableau 5.11, illustre les valeurs d'absorption capillaire mesurée des BAP soumis aux différentes cures humides initiales (0, 7, 14, et 28 jours), et qui sont présentés sur les figures 5.31, 5.32 et 5.33.

Tableau 5.11: Valeurs d'absorption capillaire en (kg/m²)

Cure humide initiale (jour)	0			7			14			28		
	BAP-0	BAP-15	BAP-25									
1mn	0.3	0.25	0.25	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.2	0.20	0.15
5mn	0.65	0.55	0.50	0.55	0.45	0.45	0.4	0.35	0.35	0.3	0.25	0.20
10mn	0.75	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.4	0.4	0.4	0.35	0.30
20mn	1.05	0.90	0.85	0.6	0.55	0.55	0.5	0.45	0.42	0.45	0.4	0.35
30mn	1.15	0.95	1.12	0.68	0.65	0.72	0.55	0.5	0.5	0.51	0.425	0.45
01h	1.49	1.36	1.45	1.01	0.9	0.94	0.67	0.65	0.65	0.6	0.55	0.57
02h	1.82	1.75	1.78	1.38	1.17	1.25	0.97	0.85	0.90	0.94	0.85	0.650
03h	2.27	2.15	1.9	1.63	1.25	1.45	1.19	1.15	0.95	1.09	0.95	0.73
04h	2.67	2.43	2.25	1.89	1.5	1.60	1.42	1.35	1.20	1.35	1.25	1.15
05h	2.91	2.67	2.4	2.15	1.65	1.65	1.57	1.55	1.25	1.35	1.30	1.22
06h	3.05	2.75	2.55	2.25	1.95	1.84	1.75	1.65	1.45	1.4	1.35	1.30
07h	3.15	2.85	2.6	2.4	2.25	2.15	1.9	1.7	1.55	1.45	1.40	1.35
08h	3.2	2.9	3.15	2.45	2.38	2.40	1.95	1.75	1.85	1.5	1.46	1.45
12h	4.15	3.95	4.05	3.28	3.15	3.25	2.60	2.35	2.45	2.05	1.90	1.95
01jr	7.05	6.15	6.55	5.4	5.2	5.25	4.55	4.15	4.35	3.5	3.25	3.32
02jrs	9.05	7.9	7.75	7.2	6.85	6.31	6.3	5.45	5.15	5.4	5.1	4.85
03jrs	10.45	8.95	8.82	8.2	7.75	7.3	7.85	7.25	6.95	6.9	6.75	6.55
04jrs	11.45	9.75	9.73	9.3	8.95	8.35	8.78	8.65	8.25	7.65	7.6	7.55
05jrs	12.25	10.75	10.58	9.9	9.42	9.12	9.75	9.37	9.19	8.25	8.05	7.95
06jrs	12.81	11.95	11.35	10.75	10.35	10.15	10.32	10.25	10.15	8.55	8.25	8.05
07jrs	13.1	12.4	12.05	11.3	10.55	10.65	10.5	10.45	10.40	8.85	8.35	8.25
08jrs	13.65	12.7	12.52	11.7	10.65	11.35	10.6	10.55	10.45	9.15	9.05	8.95

La figure 5.31 montre la variation de l'absorption capillaire en fonction de la durée de cure humide en gardant un pourcentage constant de la teneur en pouzzolane. On peut constater que l'absorption capillaire d'eau diminue en fonction de la durée de la cure humide initiale. Une diminution du coefficient d'absorption capillaire mesurée à 8 jours pour une cure humide initiale de 28 jours de 33,33%, 28,74% et 28,51% par rapport à une cure humide initiale nulle (0 jour), respectivement pour les BAP-0, BAP-15 et BAP-25. Ces valeurs nous montrent l'effet positif de la cure humide initiale sur la diminution de l'absorption capillaire des BAP. Pour l'absorption capillaire des grands pores qui a été mesurée en plusieurs échéances jusqu'à 6 heures (1min, 5min, 10min, 20min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, et 6h). L'effet de la cure humide initiale sur l'absorption capillaire des grands pores est bien illustré par la figure 5.32. On constate toujours que la cure humide initiale de 28 jours donne les coefficients d'absorption les plus faibles.

En gardant la durée de cure humide constante, les figures 5.33 à 5.36 montrent la variation de l'absorption capillaire en fonction de la teneur en pouzzolane. Le BAP-15 engendre les plus faibles valeurs d'absorption capillaire pour toutes les différentes cures humides initiales. Par conséquent, l'incorporation de la pouzzolane a joué un rôle efficace de diminution de l'absorption d'eau, qui dépend de l'état d'hydratation atteint après un certain temps de conservation dans l'eau, suivi par la réaction de la pouzzolane après 28 jours, et au raffinement des pores capillaires de la matrice cimentaire du béton durci.

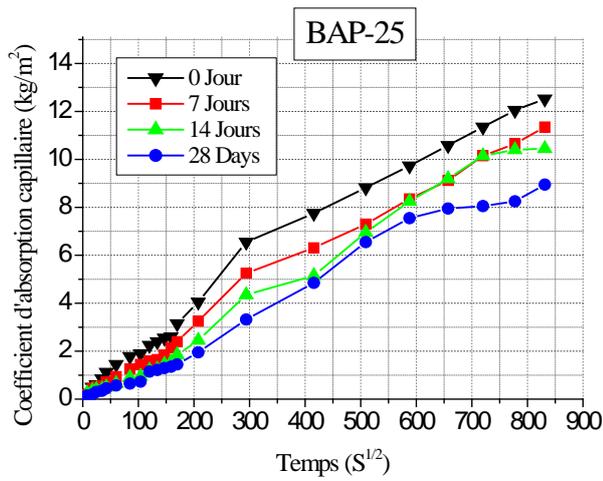
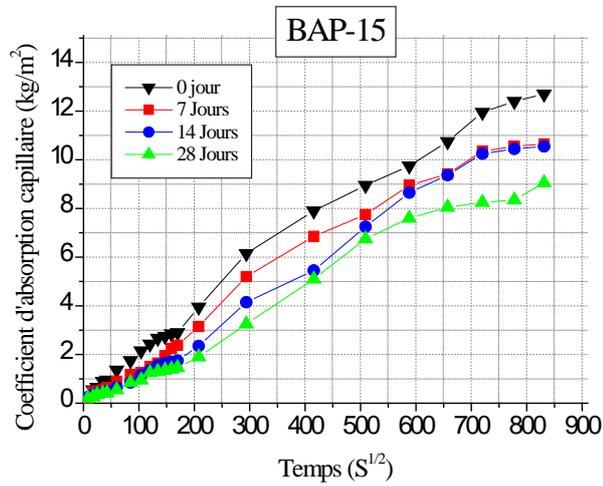
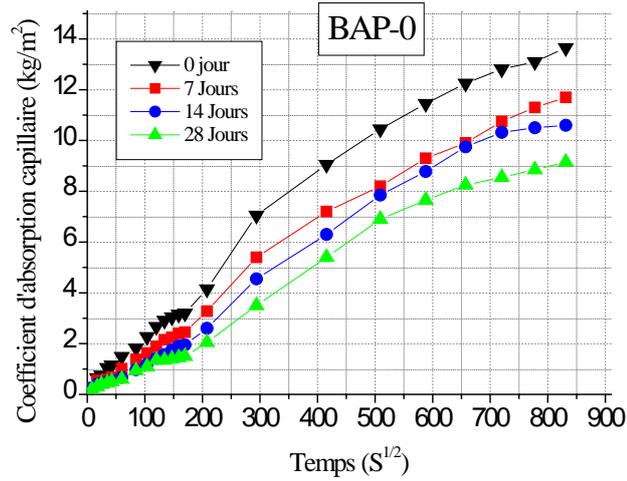


Figure 5.31: Effet de la durée de cure humide initiale sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours.

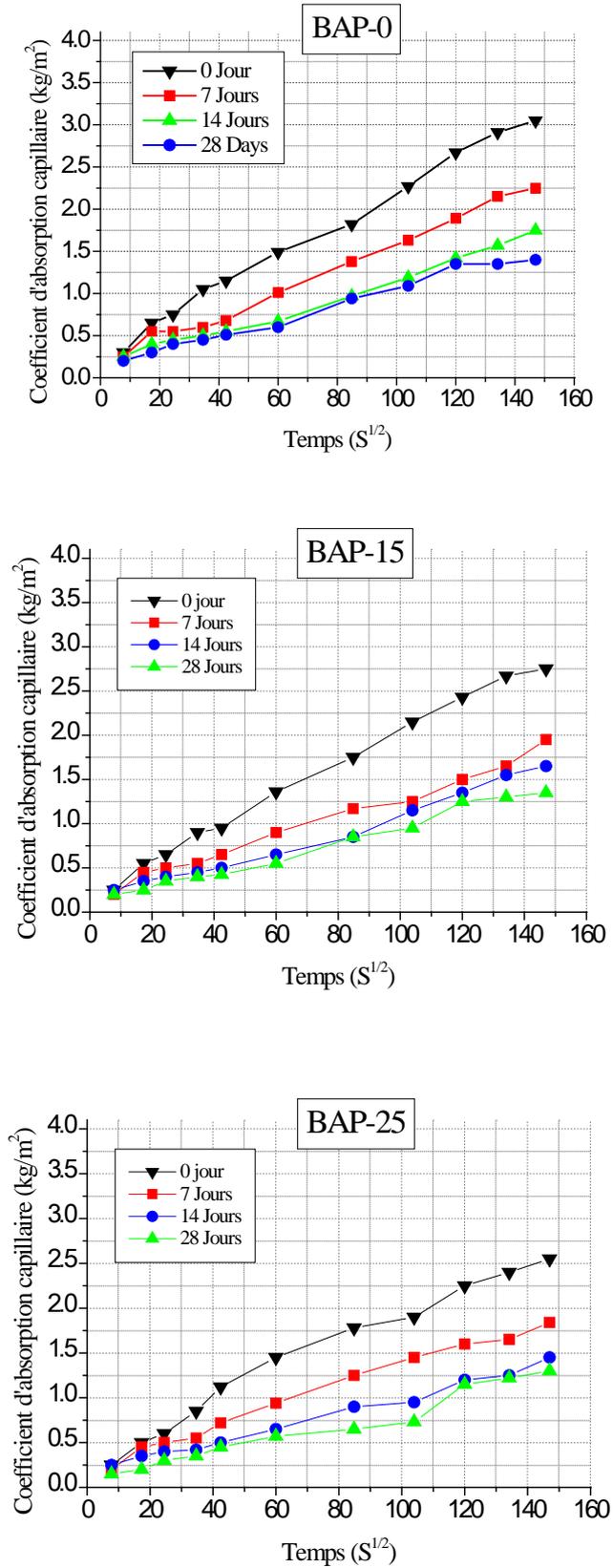


Figure 5.32: Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des gros pores à 90 jours.

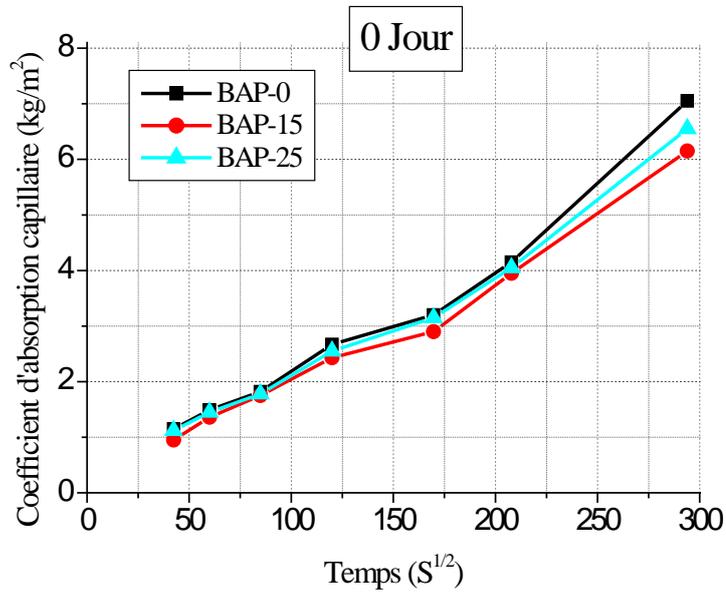


Figure 5.33: Effet de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface à 90 jours pour une cure humide de 0 jour.

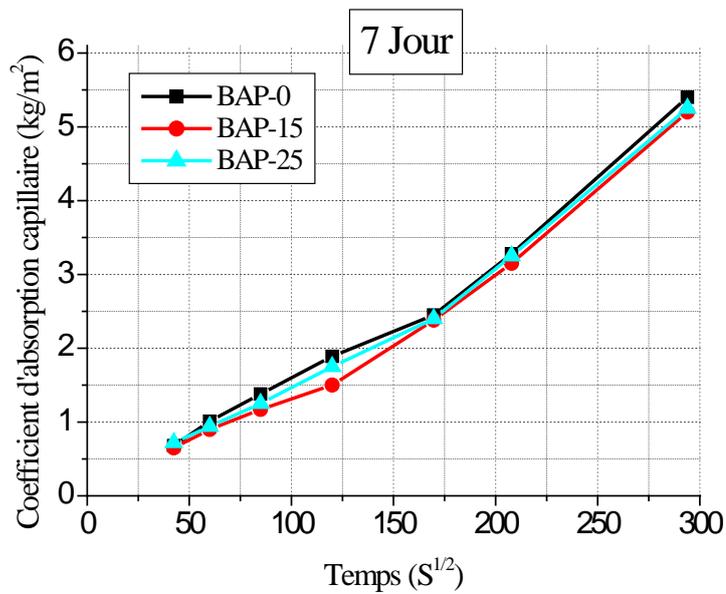


Figure 5.34: Effets de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface pour une cure humide de 7 jours.

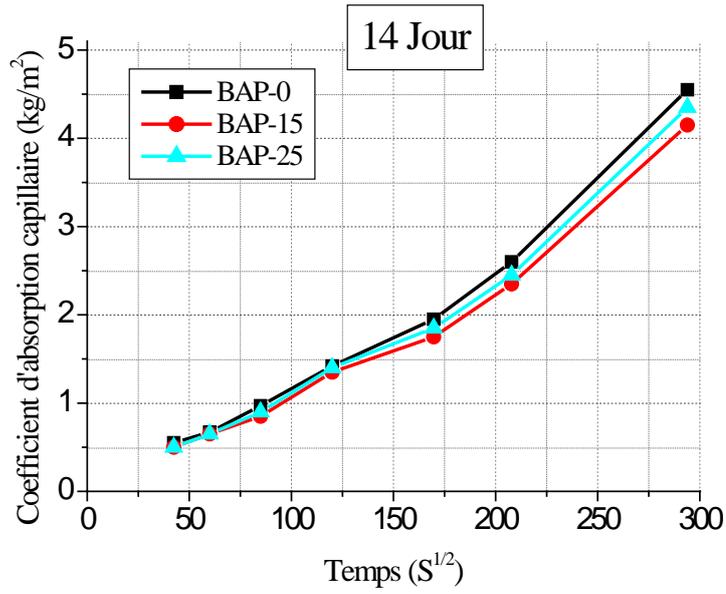


Figure 5.35: Effets de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface pour une cure humide de 14 jours.

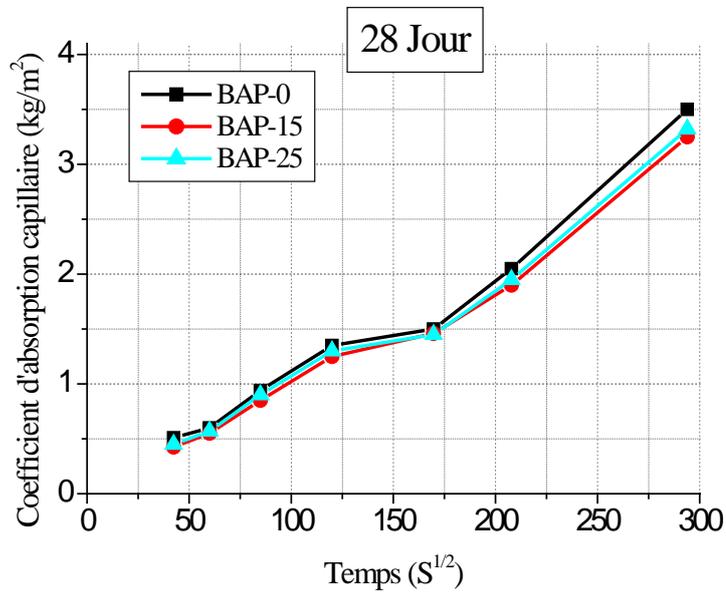


Figure 5.36: Effet de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface pour une cure humide de 28 jours.

Le coefficient d'absorption le plus faible a été obtenu pour le BAP avec de la pouzzolane naturelle, ce qui montre le rôle de la pouzzolane naturelle dans l'affinage de la structure des pores du béton lorsqu'un durcissement approprié est effectué. Cela pourrait être dû aux pores de la pâte en vrac ou aux interfaces entre l'agrégat et la pâte de ciment remplies par ces minéraux. La taille, la distribution, la forme, la tortuosité et la continuité de ses pores ont une incidence sur la succion capillaire. La réaction pouzzolanique fixant la chaux, les pores capillaires sont réduits par la formation de gels de deuxième génération [CSH], bloquant ainsi l'absorption [126].

Daboucha et al. [173, 174], ont étudié l'évolution du coefficient d'absorption d'eau capillaire des mortiers et du béton contenant différentes quantités de NP (10, 20, 30 et 40%). Les résultats ont montré une diminution de l'absorption capillaire d'eau en fonction de la teneur en pouzzolane à 28 jours.

Leung et al. [177], ont observé que le remplacement partiel du ciment Portland ordinaire par des cendres volantes et de la fumée de silice dans le BAP réduit la capacité d'absorption de l'eau et la sorptivité.

Siad [178], a montré que l'utilisation d'ajouts minéraux tels que les cendres volantes, la poudre de calcaire et les fumées de silice réduisait l'absorption capillaire. Kazim et al. [39] ont rapporté que la substitution du ciment par de la fumée de silice ou des cendres volantes réduise significativement l'absorption d'eau des BAP et donne des bonnes résistances mécaniques.

Assié [27], a constaté que les BAP et les bétons vibrés (BV) V possèdent des coefficients d'absorption capillaire équivalents dont l'évolution selon la résistance en compression est semblable. Il a cité d'autres travaux qui ont rapporté que généralement les BAP présentent une vitesse d'absorption légèrement inférieure ou similaire à celle du béton vibré et de même résistance à la compression.

Brabha et al. [179], ont remarqué l'influence des cendres volantes sur l'absorption capillaire des échantillons de BAP immergés dans l'eau, une diminution de l'absorption avec l'augmentation de la période de durcissement a été remarquée surtout de 28 à 56 jours pour les BAP contenant un volume élevé de cendres volantes.

Selon Siad [178], les additions minérales (les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF)) sont bénéfiques pour l'augmentation de la résistance et la réduction de l'absorption capillaire. L'absorption initiale est d'autant plus forte qu'elle est mesurée sur des bétons à faible dosage en ciment. En outre l'augmentation de la durée de cure diminue d'autant plus l'absorption initiale que les durées de cure sont initialement faibles.

Les résultats de Van lee [105], sur l'absorption d'eau des trois types de BAP (liant binaire plus fillérisé, moins fillérisé et liant ternaire), a montré qu'il n'y a aucune tendance qui se dégage selon le type de matrice utilisée. D'autre part, pour un mélange donné, la hausse de température, qu'elle soit de confection ou de maturation, ainsi que le moyen de maintenir la rhéologie n'affecte pas significativement cette propriété d'absorption.

5.5.6 Perméabilité a l'eau

La perméabilité traduit l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression motrice. Elle va informer sur l'inter connectivité et la tortuosité du réseau poreux. Cette perméabilité à l'eau des BAP développés a été évaluée en mesurant la profondeur de pénétration de l'eau, ce qui constitue une évaluation indirecte fiable de la perméabilité à l'eau du béton [181]. La figure 5.37 montre la variation de la perméabilité d'eau en fonction la durée de cure humide initiale pour différents dosages en pouzzolane naturelle. Le tableau 5.13 illustre les valeurs de la perméabilité d'eau à 90 jours.

Tableau 5.12: Valeurs de la perméabilité d'eau des BAP à 90 jours

Cure humide en jour	0	1	3	7	14	28
BAP-0 (mm)	87.25	65.12	55.35	49.5	33.33	27.66
BAP-15(mm)	58.5	43.25	38.71	36.86	32.66	19.5
BAP-25(mm)	60.67	56.25	48.5	41.33	40.75	38.5

On remarque que la profondeur de pénétration de l'eau de BAP diminue avec l'augmentation de la durée de cure humide. Un écart de 68.30%, 66,7% et 36,6% de diminution de la profondeur de pénétration d'eau des BAP (0%,15% et 25%) respectivement est remarqué entre la conservation directe au climat chaud (cure humide 0jour) et la conservation à une cure humide pendant 28 jours. Ceci est dû à l'obturation des pores et diminution de la perméabilité par l'hydratation lente et continue du ciment dans l'eau. Par contre l'effet du climat chaud sur le béton accentuera la production des gros pores.

L'effet de la teneur en pouzzolane est présenté sur la figure 5.38. On constate que les bétons au 15% de pouzzolane présentent une profondeur de pénétration d'eau nettement inférieure à celle du béton de référence sans ajout.

Un écart de la profondeur de pénétration d'eau de l'ordre de 29.5% entre le BAP-15 et le BAP-0 est observé pour une cure humide initiale de 28 jours. Ceci peut être expliqué par l'effet positif de la pouzzolane à long terme par sa lente hydratation qui se traduit par la diminution de la taille des pores de la structure, et réduit de ce fait la perméabilité des BAP au Pouzzolane à un dosage de 15%.

La figure 5.39 montre une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration d'eau.

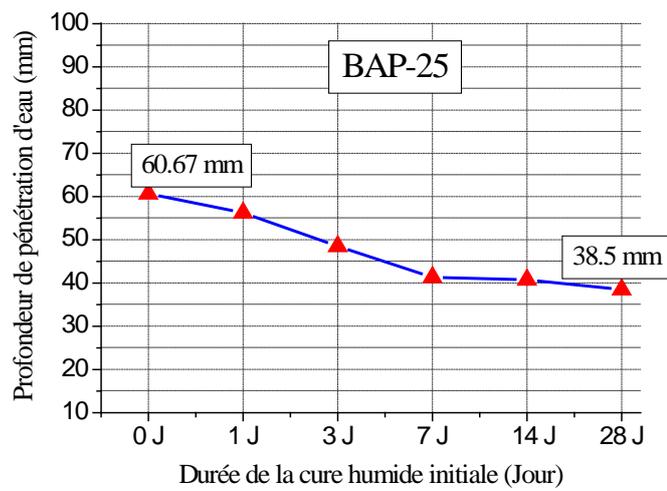
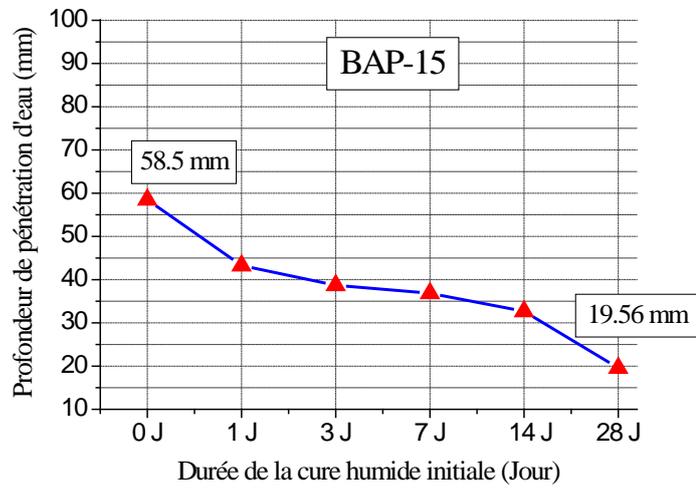
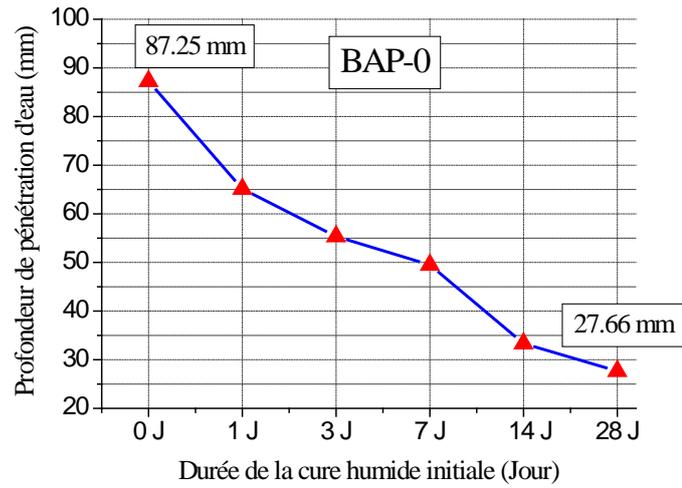


Figure 5.37: Effet de la durée de cure humide initiale sur la profondeur de pénétration d'eau à 90 jours.

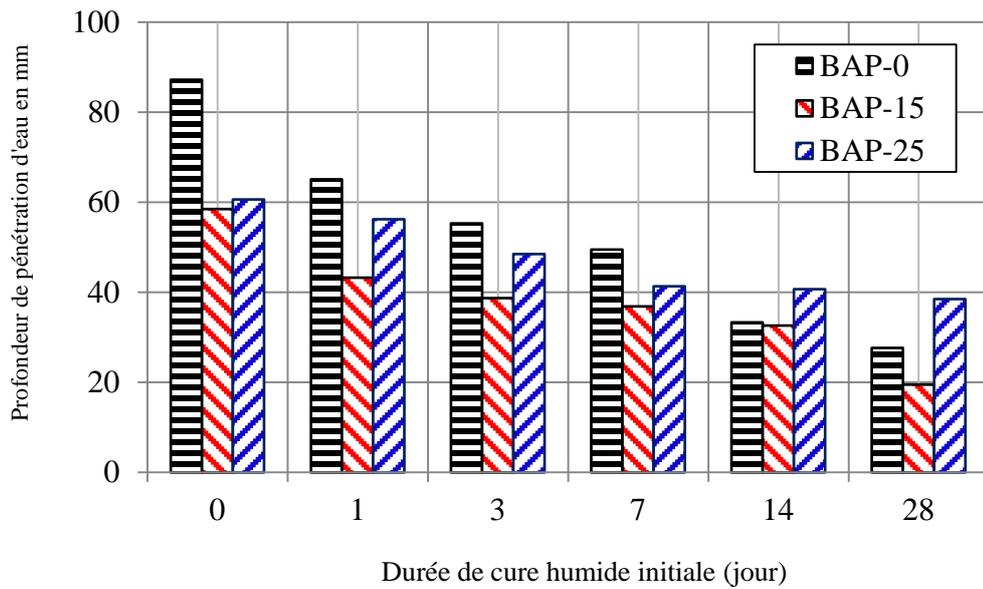


Figure 5.38: Effet de la teneur en pouzzolane sur la profondeur de pénétration d'eau des BAP à base de Pouzzolane.

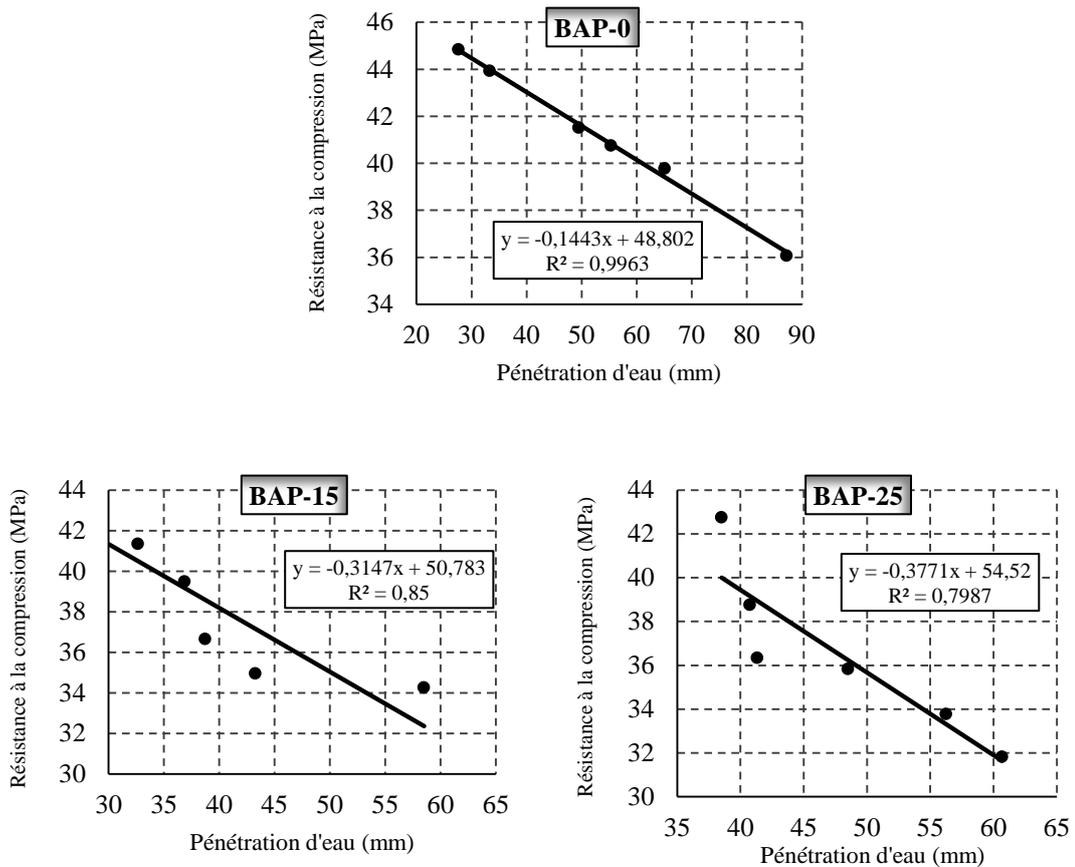


Figure 5.39: Corrélation entre la résistance à la compression et la pénétration d'eau.

Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres chercheurs en utilisant d'autres ajouts minéraux. Kenai et al.[182], ont trouvé que l'incorporation de laitier de haut fourneau en tant qu'addition minérale dans les BAP influe d'une manière significative sur les propriétés du BAP à l'état frais et la durabilité à l'état durcis à long terme, et les meilleures valeurs de porosité, perméabilité et l'absorption capillaire ont été obtenues à un pourcentage de 15% de laitier.

Des essais sur la perméabilité aux gaz montrent qu'après 28, 90 et 360 jours de cure, les BAP contenant de la pouzzolane naturelle représentent des performances très comparables à celles obtenues sur des BAP à base de cendres volantes et bien meilleures que celles obtenues sur des BAP formulés avec du filler calcaire (Siad et al)[49]. Mokhtaria et Kazi [183], ont montré que la pouzzolane de Béni-saf améliore les propriétés mécaniques et la résistance aux agressions chimiques des mortiers.

Selon Van Lee [105], la température n'influe pas significativement sur la perméabilité quelle que soit la matrice utilisée (liants binaires plus ou moins fillérisés et liant ternaire).

Ghahari et al. [184], ont remarqué qu'à l'âge de 90 jours, les spécimens avec de la pouzzolane naturelle ont une profondeur de pénétration de l'eau de 10,8 mm, soit 14% de moins que celle du béton sans pouzzolane. La pouzzolane réduit la pénétration de l'eau dans le béton, améliorant ainsi sa durabilité Ahmad et al. [185].

La figure 5.39 montre la bonne corrélation entre résistance à la compression et perméabilité à l'eau. Les résultats de perméabilité à l'eau sont liés à la taille et au type de pores de la porosité totale.

5.5 Conclusion

Les résultats obtenus sur le BAP à base de la pouzzolane naturelle, révèlent que :

A l'état frais.

- Une augmentation du temps V_{funnel} , du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique et une diminution du diamètre d'étalement, du rapport L-box et de la laitance pour la ségrégation en fonction de la teneur en pouzzolane sont bien remarqués. Ceci est lié aux caractéristiques physiques et chimiques de la pouzzolane naturelle utilisée.

A l'état durci.

- Le climat chaud affecte négativement la résistance à la compression des BAP. Cependant la cure humide initiale est bénéfique en particulier en présence de la pouzzolane naturelle.
- A l'âge de 28 jours le BAP-0 donne des valeurs résistance à la compression plus élevées que celles des BAP-15 et BAP-25. Cependant, entre 28 et 90 jours un gain de résistance est bien remarqué pour le BAP-15 qui donne les valeurs à la compression les plus élevées.
- La porosité, l'absorption capillaire et la profondeur de pénétration de l'eau diminuent avec l'augmentation de la durée de cure humide initiale.
- Le BAP-15 présente des valeurs plus faibles que celle du BAP-0 en termes de porosité, absorption capillaire et pénétration d'eau, ce qui montre l'efficacité de la pouzzolane sur l'amélioration des indicateurs de durabilité des BAP.
- Les bétons qui n'ont reçu aucune cure humide initiale présentent la plus mauvaise performance en termes de résistance en compression, porosité, absorption capillaire et perméabilité.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES
ET
RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS1. Conclusions générales

Ce travail contribue à la compréhension de l'influence des conditions de conservation sur les bétons auto-plaçant à base de la pouzzolane naturelle de Béni-saf. L'optimisation de la formulation du BAP a été obtenue en se basant sur la méthode d'Okamura. D'après les résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées.

- Les résultats de mini cône et de V-funnel effectués sur mortier, ont permis de déterminer le dosage optimal en superplastifiant qui était de 1.8% en poids de ciment.
- L'incorporation de la pouzzolane en tant qu'additions minérales dans les BAP influe d'une manière significative sur ses propriétés à l'état frais et sur la durabilité à long terme. Le taux de substitution de 15% du ciment par la pouzzolane correspond au dosage optimal.
- L'augmentation de la teneur en pouzzolane diminue la stabilité du BAP et réduit ses propriétés d'ouvrabilité. La viscosité plastique et le seuil de cisaillement des BAP augmentent en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle. La viscosité plastique a augmenté de 6.26 Pa.s à 11.55 Pa.s lorsque la teneur en pouzzolane a augmenté de 0% à 25% tandis que l'augmentation du seuil de cisaillement était de 9.21 Pa à 25.14 Pa.
- La substitution du ciment par la pouzzolane naturelle a un effet positif sur la compression à long terme en raison l'activité pouzzolanique de la pouzzolane naturelle.
- La conservation des éprouvettes au climat chaud contribue à des modifications physico-chimiques qui conduisent à une augmentation de la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire par rapport à celles conservées dans l'eau. La pouzzolane naturelle a un effet bénéfique sur les indicateurs de durabilité.
- Le climat chaud affecte négativement la résistance à la compression du béton. La durée de cure humide initiale a un effet bénéfique sur la résistance à la compression en particulier en présence de la pouzzolane naturelle.
- L'augmentation de la durée de cure humide a aussi un effet positif sur la porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire et la pénétration d'eau des BAP.

- Le climat chaud n'a pas un effet négatif sur la réaction de la pouzzolane à long terme.
- Les essais de durabilité sur les BAP à base de pouzzolane ont mis en évidence les effets de la microstructure. L'incorporation de la pouzzolane à un taux de 15% a joué un rôle efficace qui s'est traduit par une légère augmentation de la résistance à la compression à long terme et une réduction de la perméabilité, la porosité et l'absorption capillaire. L'amélioration de ces propriétés pourrait être due à l'activité pouzzolanique de la pouzzolane naturelle, qui a une teneur élevée en SiO_2 .
- Une bonne corrélation a été obtenue entre la résistance à la compression avec la porosité, l'indice de rebondissement et la perméabilité à l'eau.
- Les conclusions ci-dessus illustrant des améliorations de la résistance à la compression, de la porosité accessible à l'eau, de l'absorption capillaire et de la pénétration d'eau des BAP, font de la pouzzolane naturelle de l'Algérie un matériau approprié pour la production de ciment composé.

2. Recommandations :

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont été limités à l'étude de l'effet du climat chaud sur les performances des BAP à base de la pouzzolane naturelle. D'autres aspects restent à étudier. Ainsi, nous recommandons pour les futurs travaux, de se pencher sur les thèmes suivants :

- Réaliser une étude comparative entre l'effet du climat chaud, standard et froid sur la performance des BAP à base de la pouzzolane.
- L'effet du climat chaud sur d'autres paramètres (retrait plastique et le retrait de séchage des BAP, des essais d'attaque chimique et de perméabilité au gaz).
- L'effet du climat chaud sur la performance des BAP dans un environnement sec.
- Effet du climat chaud sur la performance des BAP à base des ajouts minéraux combiné.
- Effet du climat chaud sur la microstructure des BAP à long terme.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [01] Funda, ZT., Mahmut, A., Güler S., The effect of high temperature on physical and mechanical properties of self-compacting lightweight concretes., Int'l Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Eng.(IJRCMCE).vol. 3, n° 2, pp. 2349-1450, 2016.
- [02] Girish, S., Ranganath, R. V. and Vengala, J., Influence of powder and paste on flow properties of SCC.Construction and Building Materials, vol. 24 n° 12, pp. 2481–2488, 2010.
- [03] 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. (Indice de classement : P18-211), Juillet 2003.
- [04] Hamid, H., Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais. Etude sur systèmes modèles. Thèse de Doctorat, Université Paris-EST, 2012.
- [05] Bouhamou, N., Belas, N., Mesbah, H., Mebrouki, A et Yahia A., Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais, Afrique science, vol. 04, pp. 1 - 20, 2008.
- [06] Sandrine, B., Mécanismes de ségrégation dans les bétons Auto-plaçants (BAP). Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [07] Aîtcin, PC., Les superplastifiants : des réducteurs d'eau pas comme les autres. Recueil de conférences présentées à l'Université de Sherbrooke, réf. ATILH, n° 28594, 1990.
- [08] Shindoh, T., Matsuoka, Y., Development of combination type of self-Compacting concrete and evaluation test methods. Journal of Advanced Concretete Technology, vol. 1, n°1, pp. 26-36, 2003.
- [09] Jing, P., Effet de la température et de l'agitation sur les propriétés rhéologiques des bétons fluides à rhéologie adaptée. Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, 2015.
- [10] Flatt, R.J., Polymeric dispersants in concrete. In Polymers in particulate systems-properties and application, Scientific production and competence, STI, School of Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York, 249 pages, 2002.
- [11] El Barrak, M., Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons auto-plaçant à l'état frais. Thèse de Doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier, Juillet, 228 pages, 2005.

Références bibliographiques

- [12] Kawai, T., Non dispersible under water concrete using polymers, marine concrete. In proceedings of the International Congress on Polymers in Concrete, Brighton, England, 6 p, 1987.
- [13] Brooks, J. J., Johari, M. A. M. and Mazloom, M., Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cement & Concrete Composites*, vol. 22, pp. 293-301, 2000.
- [14] Petersson, Ö., Billberg, P., Investigation on blocking of Self-Compacting Concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler. Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete in Sweden, pp. 333-344, 1999.
- [15] Okamura, H., Ouchi, M., Self-compacting concrete, *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, pp. 5-15, 2003.
- [16] Diederich, P., Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [17] Turcry, Ph., Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2004.
- [18] Okamura, H., Ozawa, K., Mix design for self-compacting concrete. *Concrete library of JSCE*, n° 25, pp. 107-120, 1995.
- [19] Sedran, T., Rhéologie et rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants. Thèse de Doctorat, Ecole des ponts et chaussées, 220 pages, 1999.
- [20] Latifou, B., Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons autoplaçants légers et durables. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2, 2014.
- [21] Ozawa, K., Maekawa, K and Okamura, H., Development of high performance concrete, *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo*, vol. XLI, pp. 381-439, 1992.
- [22] Tangtermsirikul, S and Van, B. K., Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete, *Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, SC-4*, pp. 58-69, 1995.
- [23] Su, N and Miao, B., A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 215-222, 2003.

Références bibliographiques

- [24] Sedran, T., de Larrard, F., Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model, Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 321-332, 1999.
- [25] Ferraris, C. F and De Larrard, F., Testing and modeling of fresh concrete rheology, National Institute of Standards and Technology, 59 p.1998.
- [26] AFGC., Recommendations for the use of self-compacting concretes, French Association of Civil Engineering, Documents scientifiques et techniques, 2008.
- [27] Assié, S., Durabilité des bétons auto-plaçant, Thèse de Doctorat de L'INSA de Toulouse, 2004.
- [28] Benaïcha, M., Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons, Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille (France), 2013.
- [29] Domone, P. L. J., Xu, Y., Banfill. P. F. G., Developments of the two-point workability test for high-performance concrete. Magazine of Concrete Research, vol. 51, pp. 181-190, 1999.
- [30] Chapdelaine, F., Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais. Mémoire pour l'obtention du grade de maître Science (M.Sc), Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval (Canada), p. 32, 1998.
- [31] Wallevik, O. H., Gjørsv, O. E., Development of a coaxial cylinder viscometer for fresh concrete, Properties of fresh concrete, Proceedings of the Rilem Colloquium, Chapman & Hall, Hanover, pp. 213-224, 1990.
- [32] Hu, C., De Larrard, F., Sedran T., Boulay, C., Bosc, F., Defiorene, F., Validation of BTRHEOM, The new rheometer for soft-to-fluid concrete, Materials and Structures, vol. 29, pp. 620-631, 1996.
- [33] Boukendakdji, O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires. Thèse de Doctorat, Université Saad Dahlab, Blida1, 2010.
- [34] Boucetta, T. A., 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 de Annaba, 2014.
- [35] Klug, Y. and Holschemacher, K., Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete, 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp. 596-605, 2003.

Références bibliographiques

- [36] Gibbs, J., Zhu, W., Strength of hardened self-compacting concrete. Proceedings of the first international RILEM symposium on Self-Compacting concrete, Stockholm, Suède, pp. 199-209, 1999.
- [37] De Larrard, F., Structures granulaires et formulation des bétons, Laboratoire Centrale des ponts et chaussées. Paris, 2000.
- [38] Pera, J., Husson, S., Guilhot, B., Influence of finely ground limestone on cement hydration, Cement and concrete composites, vol. 21, n°2, pp. 99-105, 1999.
- [39] Kazim, T., Caliskan, S., Yazicioglu, S., Capillary water absorption of self-compacting concrete under different curing conditions. pp. 365-372. Sherbrooke Québec, Canada, 2005.
- [40] Turkey, P., Rozière, E., Loukili, A., Influence du volume de pâtes et des additions sur le retrait de fissuration des bétons auto-plaçant. XXII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Grenoble, 2005.
- [41] Assié, S., Escadeillas, G., Marchese, G. and Waller, V., Durability properties of low-resistance self-compacting concrete, Magazine of Concrete Research, vol. 58, pp.1-7, 2006.
- [42] Persson, B., Creep, Shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete, In proceedings of the First Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, August, pp. 239-250, 1999.
- [43] Aïcha, FG., Compatibilité déformationnelle des bétons auto-plaçants pour des utilisations dans les réparations des infrastructures routières, Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, 2014.
- [44] Proust, E., Retrait et fluage des bétons auto-plaçants : Vers une meilleur compréhension des comportements différés, Thèse de Doctorat de L'INSA de Toulouse, 2002.
- [45] Zhu, W., Gibbs, J. C., Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, vol 35, Issue 8, pp. 1457-1462, 2005.
- [46] Zhu, W., Quinn, J., Bartos, P. J. M., Transport properties and durability of self-compacting concrete. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp. 451-458, 2001.
- [47] Dinakar, P., Babu, K. G. and Santhanam, M., Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes, Cement & Concrete Composites, vol. 30, pp. 880-886, 2008.

Références bibliographiques

- [48] Perraton, D., Aitcin, P. C. et Carles-Gibergues, A., Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 221, pp. 69-78, 1999.
- [49] Siad, H., Kamali, Bernard S., Mesbah, H. A., Mouli, M. et Khelafi, H., Influence du type d'addition minérale sur les propriétés de transfert des bétons autoplaçants, IInd International Seminar INVACO – Innovation & Valorization in Civil Engineering & Construction Materials, vol. 2, 2012.
- [50] Zhu, W., Bartos, P.J.M., Permeation properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, 33, pp. 921-926, 2003.
- [51] Tang, L., Andalen, A., Johansson, J. O. and Hjelm, S., Chloride diffusivity of self-compacting concrete, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp.187-198, 1999.
- [52] Begarin, A., Etude de paramètres endogènes et exogènes au ciment portland ordinaire influençant l'hydratation de sa phase principale: Le silicate tricalcique, Thèse de Doctorat; Université de Bourgogne, 2012.
- [53] Bastide, J. C., La fabrication de ciment- ciments français. Edition Eyrolles, Paris, p.61, 1993.
- [54] Amouri, Ch., Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité). Thèse de Doctorat. Université de Constantine, 2009.
- [55] Idrissi, M., Etude de l'inclusion du fer dans les ciments sulfo-alumineux et valorisation du caoutchouc dans leurs mortiers. Thèse de Doctorat, Université Mohammed V – Agdal; Rabat, 2012.
- [56] Gmira, A., Etude structurale et thermodynamique d'hydrates modèle du ciment, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 2003.
- [57] Tatyana, D., Hydratation d'un système cimentaire binaire contenant des cendres volantes de biomasse. Thèse de Doctorat; Université de Sherbrooke, Canada, 2015.
- [58] Older, I. H., Setting and hardening of Portland cement; Lea's chemistry of cement and concrete (Hewlett P.C., Ed.), Fourth Edition, Ed: Arnold, London, 1998.
- [59] Nassima, S., Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation, Thèse de Doctorat; Université de Constantine, P46, 2010.
- [60] Fedaou, I., Étude du comportement mécanique et durabilité des bétons fibrés : influence de différents environnements et de la nature des fibres. Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2016.

Références bibliographiques

- [61] Vincke, E., Wanseele, E V., Monteny, J., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Dionys, V G., Verstraete, W., Influence of polymer addition on biogenicsulfuricacid attack of concrete, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 49, n° 4, pp. 283-292, 2002.
- [62] Macleod, N. F., L'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglçage, *Cement Association of Canada*, pp. 10-12, 2005.
- [63] Duval, R., Kadri, EH., Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 4, pp. 533-47, 1998.
- [64] Buil, M., Witier, P., de Larrard, F., Detrez, M., Paillere, AM., Physicochemical mechanism of the action of the naphthalene sulfonate based superplasticizer on silica fume concretes, *Proceedings of the Second International Conference on Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Madrid, ACI, SP91-46, vol. 2, pp.959-971, 1986.
- [65] Adjoudj, M., Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Thèse de Doctorat. Université Hassiba Benbouali, Chlef, 2015.
- [66] Park CK., Noh MH., Park TH., Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and concrete research*, vol. 35, pp.842-49, 2005.
- [67] Feldman, R.F, Cheng-HY, H., Properties of Portland cement-silica fume pastes, 1, Porosity and surface properties. *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n°5, pp. 765-774, 1985.
- [68] Bouzoubaâ, N., Simon, Foo., Utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton, *Guide des règles de l'art*, Janvier, 2005.
- [69] Bijen, J., Benefits of slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, vol. 10, pp. 309- 314, 1996.
- [70] Boudchicha, A., Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, Thèse de Doctorat de l'université de Constantine, 294 P, 2007.
- [71] Lange, F., Mortel, N., Rudert, V., Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, *Cement and Concrete Research*, vol. 27, pp. 1481-88, 1997.
- [72] Ramachandran, VS., Mortel, N., Rudert, V., *Concrete admixtures, Handbook, Properties, Science and Technology*, Noyes Publication, NJ, 1995.

Références bibliographiques

- [73] Felekoglu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., Uyulgan, B., The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1719-26, 2006.
- [74] Venuat, M., *La pratique des ciments et des bétons*. Edition du Moniteur, Paris, pp. 75-224, 1976.
- [75] Manai, K., *Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [76] Heba, A. M., Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, vol.2, pp. 79-86, 2011.
- [77] Sow, M., *Réalisation d'éco-ciments par la valorisation de cendres volantes de charbon non conventionnelles issues de centrales thermiques Spreader Stoker*, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2016.
- [78] Ramezani pour, A. A., Esmaeili, M., Ghahari, S.A., Najafi, M.H., Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers, *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 411-418, 2013.
- [79] Marie, M., *Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux*, Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.
- [80] Charlotte, K., *Propriétés d'usage et mécanismes d'hydratation du système ternaire (Ciment Alumineux - Sulfate de Calcium - Laitier de Haut Fourneau) à haute teneur en sulfate de calcium : De l'approche expérimentale à la modélisation*, Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2015.
- [81] Izemmouren, O., *Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée*, Thèse de Doctorat, Université de Biskra Algérie, 2016.
- [82] Clément, H., *Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, 2013.
- [83] Hadj Sadok, A., Kenai, S., Courard, L., Perméabilité au gaz et aux ions chlore des mortiers à base de laitier de faible hydraulicité, *INVACO2, Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction*, n° : 10-189, 2014.
- [84] Amrane, A., Kenai, S., *Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud*, *Proceeding du Séminaire International sur la Qualité du béton en climat chaud*, Ghardaïa, pp.106-122, 1994.

Références bibliographiques

- [85] Yahiaoui,W., Kenai, S., Menadi, B., Kadri, E H., Durability of self-compacted concrete containing slag in hot climate, *Advances in Concrete Construction*, vol. 5, n° 3, pp. 271-288, 2017.
- [86] Thierry Sedran., Les bétons auto-nivelants (synthèse bibliographique). *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et des chaussées*, pp. 53-60, 1995.
- [87] Benosman, A S., Performance Mécanique et Durabilité des Matériaux Cimentaires Modifiés par Ajout de Polymère (PET), Thèse de Doctorat, Université ENSET, Oran, Algérie, 2011.
- [88] Ramezani pour, A. M., Esmaeili, K., Ghahari, S.A. and Ramezani pour, A. A., Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 187-194, 2014.
- [89] Şahmaran, M., Özkan, N., Keskin, SB., Uzal, B., Yamanİ, Ö.,Erdem, TK., Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts, *Cement and Concrete Research*, vol. 38 N° 7, pp. 930 –7, 2008.
- [90] Hallal, A., Kadri, EH., Ezziane, K., Kadri, A., Khelafi, H., Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste, *Construction and Building Materials*, vol. 24(8), pp. 1418–23, 2010.
- [91] Semcha, A., Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, Thèse de Doctorat Université de Reims, 2006.
- [92] Aissa, A., Bouiadjra, M.B., Trouzine, H., Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des bétons, XXIIIème rencontres universitaires de Génie Civil, Risque et Environnement, Université de Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2005.
- [93] Hamdi, A.; Etude de l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés aux états frais et durci des bétons ordinaires et autoplaçants, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2015.
- [94] Ayed, K., Benaissa, A., Vidal, T., Pons, G., Abidlah, A., Etude du comportement différé du BAP l'influence de la pouzzolane naturelle de Beni-saf sur le retrait du béton autoplaçant, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), vol. 6, n° 30, pp. 404-406, 2009.
- [95] Kazi, F A., K- A., Semcha, A., Kerda D., Influence des additions minérales sur la résistance mécanique des mortiers, *Afrique Science* vol. 07, n° 2, pp. 16 – 26, 2011.

Références bibliographiques

- [96] Laoufi, L., Senhadji, Y., Benazzouk, A., Langlet, T., Mouli, M., Benosman A. S., Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack, *Journal of Materials and Environ Science* vol. 7, pp. 1835-1845, 2016.
- [97] NF P18-508., Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, Janvier 2012.
- [98] El-Hilali, A., Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): Influence of limestone and fine plant fibers, Thèse de Doctorat, University de Cergy Pontoise, France, 183p, 2009.
- [99] Esping, O., Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 938-44, 2008.
- [100] Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., Irassar, E., Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, *Cement and Concrete Research*, vol 30, pp. 703-8, 2000.
- [101] Tsvivilis, S., Chaniotakis, E., Kakali, G., Batis, G., An analysis of the properties of Portland limestone, *Cement and Concrete composites*, vol. 24, pp. 371–378, 2002.
- [102] Haddadou, N., Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre, Thèse de Doctorat, Université de Boumerdes, 2015.
- [103] Benachour, Y., Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevé de fillers sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructurales, de transfert et de durabilité des mortiers, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2009.
- [104] Ait Aider, H., Le retrait plastique des bétons auto plaçant dans un environnement chaud, INVACO2, Séminaire International, Innovation & Valorisation en génie civil & Matériaux de construction, n° 1, P-338, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre, 2011.
- [105] Vinh-An, L., Comportement des bétons auto-plaçants par temps chaud, Thèse de Doctorat ; Université Toulouse3, Paul Sabatier, 2014.
- [106] Zawede, B., The Behaviour of concrete in hot climates, *Materials and Structures*, vol. 25, 147, pp. 157-162, 1992.
- [107] Mouret, M., Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud, Thèse de Doctorat de l'université de Sabatier, 1997.
- [108] Mamillan, M Z., Bétonnage par temps chaud. Connaissances actuelles et recommandations, *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et de Travaux publics*, n° 474, pp. 78-119, 1989.

Références bibliographiques

- [109] Fédération Internationale de la Précontrainte, Concrete Construction in Hot Weather, FIP Guide to Good Practice, London, Thomas Telford, 16 p., 1986.
- [110] Walker, M. J., Effect of evaporation of water from fresh concrete in hot climates on the Properties of concrete, Proceedings of the third Int. Rilem Conf. on Concrete in Hot Climates, Torquay, pp. 81-88, 1992.
- [111] Association Béton Québec, Techno-béton, Bulletin Technique, Le bétonnage par temps chaud. n°07, 2007.
- [112] Al-Abduljabbar, A. H (2008)., Effect of time and temperature on workability of SCC, Source: <http://faculty.ksu.edu.sa/28745/DocLib/Hisham.SCC.pdf>
- [113] Ghafoori, N., Diawara, H., Influence of temperature on fresh performance of self – consolidating concrete, Construction and Building Materials, vol. 24, pp.946- 955, 2010.
- [114] Petit, J.-Y., Wirquin, E., Vanhove, Y. and Khayat, K., Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete, Cement and Concrete Research, vol. 37 no. 5, pp. 655–670, 2007.
- [115] Griesser, A., Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures: rheology, phase composition, pore water and heat of hydration of cementitious systems, Thèse de Doctorat de l'Institut de Technologie Fédéral, Suisse, 147p, 2002.
- [116] Golaszewki, JG., Szwabowski, J., Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 235-248, 2004.
- [117] AFNOR, NF P15.431., Essai de Vicat, Edition du moniteur, 1989.
- [118] Vijaya, M RS., Concrete in hot weather conditions-challenges and precautions, International Journal of Science and Research (IJSR), pp. 2319-7064, 2013.
- [119] Ahmadi, B. H., Initial and final setting time of concrete in hot weather, Materials and Structures, vol. 33, pp. 511-514, 2000.
- [120] Yamada, K., Hanehara, S., Yanagisawa, T., Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 437–448, 1999.
- [121] Adjoudj, M., Ezziane, K., Perte d'efficacité d'un superplastifiant en présence d'un ciment composé et sous une température élevée, Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, Université de Chlef, octobre 2010.
- [122] Adjoudj M., Ezziane K., Kadri E., Effet de l'élévation de la température sur l'efficacité d'un superplastifiant à base de naphthalène sulfonate en présence d'un ciment composé, Revue Nature & Technologie, n° 08, pp. 35 - 40, 2013.

Références bibliographiques

- [123] Barbarulo, R., Comportement des matériaux cimentaires : actions des sulfates et la température. Thèse de Doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [124] Wang, X.-Y. and Lee, H.-S., Evaluation of the mechanical properties of concrete considering the effects of temperature and aging, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, vol. 29, pp. 581–590, 2012.
- [125] Kim, J., Hun, S. and Chul, Y., Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I, *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp.1087–1094,2002.
- [126] Gallucci, E., Zhang, X.Y. and Scrivener, K., Influence de la température sur le développement microstructural des bétons, Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Toulouse, France 19-20 juin, 2006.
- [127] Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E. and Lunk, P., Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n° 4, pp. 483–491, 2007.
- [128] Boukni, B., Contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons Auto-plaçant, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2012.
- [129] Lachmat, L., Kenai S., Effet du type et de la durée de cure sur les propriétés du béton en climat chaud, *Proceeding du Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud*, Ghardaïa, pp. 30-44, 1994.
- [130] Ramezani pour, A A., Malhotra, V M., Effect of Curing on the compressive strength, Resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, *Cement & Concrete Composites*, vol. 17, pp. 125-133, 1995.
- [131] Al-Khaja, A., Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes, *Construction and Building Materials*, vol. 11, n° 1, pp. 9-13, 1997.
- [132] Joss, M., Reinhardt, HW., Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, *Cement and Concrete Research*, vol. 11, pp. 395-406, 1981.
- [133] Jensen, O. M., Coats, A. M., Glasser, F. P., Chloride ingress profiles measured by electron probe micro analysis, *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n° 11, pp. 1695-1705, 1999.
- [134] Niyazi, U.K., Turker, F., Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types, *Construction and Building Materials*, pp. 634–645, 2007.

Références bibliographiques

- [135] Al-Khaiat, H., Haque, M. N., Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 6, pp. 859–866, 1998.
- [136] Shi, C., An overview on the activation of reactivity of natural pozzolan, *Canadian journal of civil engineering*, vol. 28, n° 5, pp. 778-786, 2001.
- [137] Domone, P.L., Chai, H.W. and Jin, J., Optimum mix proportioning of self-compacting concrete, *Proceeding on international conference on 'innovation in concrete structures: design and construction*, University of Dundee, Ed. Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, pp. 277-285, 1999.
- [138] Lanos, C., Estellé, P., Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 13n° 4, pp. 457- 471, 2009.
- [139] Chai, H., Design and testing of SCC, PhD Thesis, University College of London, 259 p, 1998.
- [140] Nawa,T., Izumi,T., Edamatsu,Y., State-of -the-art report on materials and design of self- compacting concrete, *Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete*. Japan, pp.160-190, 1998.
- [141] EFNARC (2012), The European guidelines for self-compacting concrete, *Cement Concrete Compos*, 2012.
- [142] Soualhi, H., Kadri, E.H, Ngo, T.-T., Bouvet, A., Cussigh, F., Kenai, S., A vane rheometer for fresh mortar: development and validation, *Journal Applied Rheology*, vol. 24, n° 2, 2013.
- [143] NF, P 18-406., Béton-Essai de compression, AFNOR, Paris, 1981.
- [144] NF EN 12504-4, Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation, 2005.
- [145] NF EN 12504-2, Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement, 2003.
- [146] ASTM C1585 – 11., Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes, 2012.
- [147] DIN 1048., Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure, 2000.
- [148] Falikman, VR., Sorokin, YV., Vainer, AY., bashlykov, NF., New high performance polycarboxylate superplasticizers based on derivative copolymers of maleinic acid,

Proceedings of the International Conference on Admixtures-enhancing, Concrete performances, pp. 41-46, U.K., 6 July 2005.

[149] Sugamata, T., Hibino, M., Ouchi, M., Okamura, H., A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers, Transactions of the Japan Concrete Institute, vol. 21, pp. 7-14, 1999.

[150] De Schutter, G., Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete. Growth Contract, 2005.

[151] Shamsad, A., Mohaisen K.O., Adekunle S.K., Al-dulaijan S.U., Maslehuddin M., Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures, Construction and Building Materials, pp. 437–444, 2019.

[152] Khan S.U., Nuruddin M.F., Ayub T., Shafiq N., Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete, The Scientific World Journal, Article ID 986567, vol. 2014, 2014.

[153] Debbih, A., Performance d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés, laitier et la pouzzolane naturelle, Mémoire de Magister de l'Université Saad Dahled Blida, 157 pages, 2012.

[154] Boukhelkhal, D., Boukendakdji, O., Kenai, S., Bachene, S., Effet du type d'addition minérale sur le comportement rhéologique d'un béton autoplaçant dans un climat chaud, 33èmes Rencontres de l'AUGC, Anglet, 2015.

[155] Bilgil, A., Ozturk, B., Bilgi, I., H., A numerical approach to determine viscosity-dependent segregation in fresh concrete, Applied Mathematics and Computation, vol. 162, pp. 225–241, 2005.

[156] Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E.H., Rouis F., Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete, Construction and Building Materials, vol. 23n° 7, pp. 2593–8, 2009.

[157] 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, vol. 31, pp 251–257, 2012.

[158] Hedayatinia, F., Delnavaz, M., Emamzadeh, S. S., Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan, Construction and Building Materials, vol. 206, pp. 122–129, 2019.

Références bibliographiques

- [159] ASTM C618-03., Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, 2003
- [160] Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M., Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolan and limestone blended cements, *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, pp. 542–549, 2007.
- [161] Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E.-H., Aït-Mokhtar, A., Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan, *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 415–430, 2017.
- [162] Celik, K., Hay, R., Hargis, C.W., Moon, J., Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement, *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 803–812, 2019.
- [163] Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M., Khelafi, H, B., Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar, *Powder Technology* 254, pp. 314–323, 2014.
- [164] Belhadj, A. H. M., Mahi, A., Aouel, M. Z. K., Derbal, R., Abdelhadi, H., Valorization of waste marble and natural pozzolan in mortars, *Journal Materials Environnement*, vol. 7, n° 2, pp. 429–437, 2016.
- [165] Ahmed H. K., Khalil W. I., Jumaa N.H., The effect of curing methods on the properties of high performance lightweight concrete in hot dry weather conditions, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, Vol. 21, n° 02, pp. 2520-0917, 2017.
- [166] Meridaa, A., Kharchib, F., Pozzolan concrete durability on sulphate attack, 1st International Conference on Structural Integrity, *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 832 – 837, 2015.
- [167] Boukhelkhal, A., Azzouz, L., Kenai, S., Kadri, E., Benabed, B., Combined effects of mineral additions and curing conditions on strength and durability of self-compacting mortars exposed to aggressive solutions in the natural hot-dry climate in North African desert region, *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 307–318, 2019.
- [168] Ibrahim, M., Shameem, M., Mehthel, Al M., Maslehuddin, M., Effect of curing methods on strength and durability of concrete under hot weather conditions, *Cement and Concrete Composites*, vol. 41, pp. 60–69, 2013.
- [169] Nie, S., Hu, S., Wang, F., Yuan, P., Zhu, Y., Ye, J., Liu, Y., Internal curing – A suitable method for improving the performance of heat-cured concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 294–301, 2016.
- [170] Ezziane, K., Bougara, A., Kadri, A., Khelafi, H., Kadri, E., Compressive strength of

Références bibliographiques

mortar containing natural pozzolan under various curing temperature, *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 587–593, 2007.

[171] Belaribi, O., *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane*, Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, 2015.

[172] Bakir, N., Issaad, A., Beddar, M., Influence du climat chaud et de la cure sur les propriétés du mortier, 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran, (Algeria) - October 12-14, 2009.

[173] Debouchaa, W., Oudjita, M. N., Bouzidb, A., Belagraab, L., Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete, 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD), *Procedia Engineering*, vol. 108, pp.254 – 261, 2015.

[174] Debouchaa, W., Lekloua, N., Khelidja, A., Oudjitb, N., Natural pozzolana addition effect on compressive strength and Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor, International Conference On Materials And Energy, ICOME, vol. 15, pp. 19-22, 2015.

[175] Nasir, M., Baghabra, O., Al-Amoudi, S., Al-Gahtani, H J., Maslehuddin, M., Effect of casting temperature on strength and density of plain and blended cement concretes prepared and cured under hot weather conditions, *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 529–537, 2016.

[176] Alsayed, S. H., Effect of curing conditions on strength, porosity, absorptivity, and shrinkage of concrete in hot and dry climate, *Cement and Concrete Research*, vol. 24, n° 7, pp. 1390-1398, 1994.

[177] Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., Anwar, M. P., Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 369–375, 2016.

[178] Siad, H., influence de type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, INSA de Rennes, France, 2010.

[179] Brabha, H N, Faheem, A., Ekhlasar Rahman, M., Abdul Mannan, M., Leblouba, M., Mechanical and durability properties of medium strength self-compacting concrete with high-volume fly ash and blended aggregates, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 59 n° 2, pp. 155–164, 2015.

Références bibliographiques

- [181] Adekunle, S., Shamsad, A., Maslehuddin, M., Al-Gahtani, H. J., Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers, *Cement & Concrete Composites*, vol. 62 pp. 125-133, 2015.
- [182] Kenai, S., Yahiaoui, W., Menadi, B., Effect of granulated blast furnace slag on the durability of self-compacting concrete in hot environment, *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service Life of Cement Based Materials and Structures 22-24 August*, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, vol. 2, pp. 777-788, 2016.
- [183] Benkaddour, M., Kazi, F., Semcha, A., Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle, 1st International. Conférence on Sustainable Built Environment infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran, Algeria, 2009.
- [184] Ghahari, S. A., Mohammadi, A., Ramezani pour, A. A., Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 7, pp. 82–90, 2017.
- [185] Ahmad M. A., Miri M., Rashki, M., Probabilistic and experimental investigating the effect of pozzolan and Lumachelle fine aggregates on roller compacted concrete properties, *Construction and Building Materials* 151, pp.755–766, 2017.

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

B.1. Les Données :

Pour un volume du mortier de $V=1.8l$ (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_C=3040 \text{ kg/m}^3$
- Sable : $\rho_S=2604 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{Sp}=1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $\rho_E=1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $A_b= 0.614$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$ (Par exemple)

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.40$ ou (par volume) $E/C = 1.216$

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de: $Sp = 1,8\%$ du poids de ciment (ou poudre).

B.2. Calcul d'humidité du sable :

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1=324 \text{ g}$ (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 heures puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse $M_2 = 321 \text{ g}$ et on calcul l'humidité du sable μ_S

$$\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_S - A_b$$

B.3. Calcul des quantités de chaque constituant :

B.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment $\%C$:

$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C \text{ par volume})} * 100$$

La quantité de ciment C en kg:

$$C(\text{kg}) = \frac{V \times E / C_{\text{par volume}}}{100} \times \rho_c$$

B.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S

$$S(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\text{Correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100}\right)$$

B.3.3. Le super plastifiant

La quantité du super plastifiant est Sp :

$$Sp(\text{kg}) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E_1 , qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : $\%E_{\text{vol}}$

$$\%E_{\text{vol}} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E / C_{\text{par volume}}}{(1 + E / C_{\text{par volume}})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%E_{\text{vol}} \times \rho_E}{100} \times \frac{\rho_E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{1000} \times \frac{\text{correction}}{100}\right)$$

Eau1

$$E_1 = E \times 0.70$$

Eau2

$$E_2 = E \times 0.30$$

ANNEXE B
EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier (*ANNEXE A*) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

C.1. Les Données

Pour un volume de béton de $V=20$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : $\rho_G = 1426 \text{kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : $\rho_{AG} = 2560 \text{kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2604 \text{kg/m}^3$
 - Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3040 \text{kg/m}^3$

- Les coefficients d'absorption :
 - Coefficient d'absorption du sable : $AbS = 0.614$
 - Coefficient d'absorption du Gravier : $AbG = 0.5$

- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.50$

- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A=1\%$ du volume du béton

- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}}=1.216$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = 0.40$ par unité de poids de ciment.

- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) : $\%Sp= 1,8\%$ du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

C.2. Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

$$\text{L'humidité du sable : } \mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

$$\text{L'humidité du gravier : } \mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

C.3. Calcul des différents composants

C.3.1. Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3) \times V}{1000} \left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

C.3.2. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3)}{\rho_{AG}} \times 10$$

Références bibliographiques

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable S dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S / M}{100}$$

Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

C.3.3. Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

C.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

$$Sp(kg / m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_c \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg / m^3) \times V$$

C.3.5. Eau :

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E_1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E_2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant et l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e_1

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(\frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

Références bibliographiques

L'eau contenue dans le gravier : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000} \left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenu dans le superplastifiant : e_3

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume Vde béton :

$$E(kg) = \frac{\% E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

$$\mathbf{Eau1} \quad E_1(kg) = 0.70 \times E$$

$$\mathbf{Eau2} \quad E_2(kg) = 0.30 \times E$$