

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : GENIE CIVIL

Par

Salhi Mohamed

Thème :

Effet du Climat Chaud sur la Durabilité des Bétons Autoplaçants

Soutenue le 01/02/2018,

devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Université	Qualité
EZZIANE Karim	Professeur	UHB Chlef	Président
GHERNOUTI Youcef	Professeur	UMB Boumerdes	Examineur
SAFI Brahim	MCA	UMB Boumerdes	Examineur
BELAIDI Akram Salah Eddine	MCA	UAT Laghouat	Examineur
GHRICI Mohamed	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
ALEX LI	Professeur	URCA de Reims	Co-Rapporteur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à : A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

*A celle que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de cette thèse: ma femme,
à mes enfant,*

à mes frères et mes sœurs

et à toute la famille.



Remerciements

Ce travail de thèse à été réalisé sous la direction de monsieur **Mohamed GHRICI**, Professeur à l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef, je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, tant pour ses conseils en or, son intérêt et son aide qu'il m'a accordé durant ces cinq années de thèse. Qui, malgré ses nombreuses occupations, a accepté de prendre la direction de cette thèse, transformant ainsi les difficultés rencontrées en une expérience enrichissante. Je lui suis également reconnaissant de m'avoir assuré un encadrement rigoureux tout au long de ces années.

Je suis aussi redevable à la contribution de monsieur **Alex LI**, Professeur et Directeur du Laboratoire de Génie civil à l'Université de Reims, pour mon accueil au sein de son laboratoire pour la réalisation les essais de durabilité, dans le cadre d'une bourse PNE.

Mes remerciements vont particulièrement à monsieur **BLIARD Christophe**, Chargé de recherche CNRS, Université de Reims Champagne-Ardenne pour sa disponibilité et sa collaboration fructueuse.

Je voudrai également adresser mes remerciements à Monsieur **Karim EZZIANE**, Professeur à l'Université de Hassiba Benbouali Chlef, de m'avoir fait l'honneur de présider mo jury de soutenance.

Je désire très sincèrement remercier les membres de jury Monsieur **Youcef GHARNOUTI**, Professeur à l'Université de Boumerdes, Monsieur **Brahim SAFI**, MCA à l'Université de Boumerdes et Monsieur **Akram Salah Eddine BELAIDI**, MCA à l'Université de Laghouat, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner le travail de ma thèse de doctorat, malgré leur multiple responsabilités et par leur remarques qui seront utiles pour le reste de mon parcours académique.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des doctorants que j'ai rencontré au sein du laboratoire de Géomatériaux de l'Université de Chlef (Khoudja Ali Benyahia, Benyahia Amar, Choucha Said...) et dans le laboratoire de Génie civil l'Université de Reims. L'ambiance sympathique dans les équipes de ces laboratoires et l'esprit de travail en groupe constituent incontestablement l'une des clefs de l'aboutissement de ce travail. Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser cette Thèse de Doctorat.

الملخص

يتم هيكلة الخرسانة ذاتية الضغط ودراسة خصائصها داخل المختبر بإتقان جيد حاليا. والهدف من هذا العمل هو تحديد خصائص الضغط الذاتي في الظروف المناخية الحارة وآثارها على خصائص الخرسانة الذاتية الضغط. وبشكل أكثر تحديدا، تأثير زمن المعالجة الرطبة الأولية على السلوك الميكانيكي مثل قوة الانضغاط ومعامل المرونة ومتانة الخرسانة ذاتية الضغط (المسامية الكلية وامتصاص الماء). في هذه الدراسة استخدمنا نوعين من الاسمنت المركب، وثلاثة نسب للماء (0.32-0.38-0.44) وخمسة طرق معالجة. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أنه بعد 30 دقيقة من الخلط في الظروف الحارة، عمليا ان جميع المخاليط قد فقدت خاصية الضغط الذاتي تأثرت بشكل كبير قوة الانضغاط بطرق المعالجة، حيث أن سبعة أيام من المعالجة في الماء ثم في المناخ الحار هو المدة المثلى لتطوير قوة ضاغطة أعلى، بغض النظر عن نسبة الماء وبالإضافة إلى ذلك، هناك علاقات جيدة جدا بين سرعة الموجات فوق الصوتية وقوة الانضغاط من جهة وبين ومؤشر الارتداد وقوة الضغط من ناحية أخرى. ويظهر أيضا أن معامل الامتصاص لعينات الخرسانة (خ ذ ظ (جد حساس لطرق المعالجة الأولية. العينات (خ ذ د) المحفوظة كليا في الماء أعطت معامل امتصاص أقل وهذا مهما تكن النسبة ماء. وبالإضافة إلى ذلك صب الخرسانة في الظروف الحارة يغير كثيرا المسامية. ومن ناحية أخرى، امتصاص الماء لا يتأثر كثيرا بارتفاع درجة الحرارة.

كلمات المفاتيح: الخرسانة الذاتية الضغط -المناخ الحار، وقت المعالجة الاولي، قوة الانضغاط، المسامية، قوة الامتصاص، العلاقات.

Abstract

The formulation of self-compacting concretes (SCC) and the study of their properties within the laboratory are well mastered currently. The aim of this work is to characterize self-compacting under hot climatic conditions and their effects on fresh and hardened properties. Particularly, study of the effect of the initial wet curing time on the mechanical behavior such as the compressive strength and the elastic modulus and the durability of the SCCs (sorptivity, total porosity and water absorption). In this study, we used two types of composite cement, CEMII-A-C and CEMII-A-P, three water/binder ratio (0.32-0.38-0.44) and five cure modes. The obtained results show that after 30 minutes of mixing in a hot climate, practically all SCCs lose their self-compacting characteristic. The compressive strength is strongly influenced by the curing methods, seven days of curing in the water and then followed by a maturing in a hot climate was the optimal duration for the development of a better compressive strength, regardless of the type of binder and the E/L ratio. In addition, there are very good correlations between the UPV and the compressive strength on the one hand and between the IR and the compressive strength on the other hand. It is also shown that the sorptivity coefficient of SCCs is very sensitive to curing conditions. The SCC samples kept in the water show a low sorptivity coefficient regardless of the W/B ratio. Additionally, the hot climate appears to significantly modify the porosity of the SCCs, However, water absorption can be influenced by temperature elevation.

Key words: Self-compacting concrete, Hot climate, Initial curing time, Compressive strength, Porosity, Sorptivity, Correlations.

Résumé

La formulation des bétons autoplaçants (BAP) et l'étude de leurs propriétés au sein du laboratoire sont bien maîtrisées à l'état actuel. L'objectif de ce travail est d'analyser les effets des conditions des Climats chauds sur les propriétés des BAPs à l'état frais et à l'état durci. Particulièrement, l'étude de la durée de cure humide initiale sur le comportement mécanique tel que la résistance à la compression et le module d'élasticité et sur la durabilité des BAPs (Sorptivité, porosité totale et absorption d'eau). Dans cette étude nous avons utilisé deux types de ciment composé, un CEMII-A-C et CEMII-A-P, trois rapport eau/liant(0.32-0.38-0.44) et cinq mode de cure. Les résultats obtenus montrent qu'après 30min de malaxage dans un climat chaud pratiquement tous les BAPs perdent leur caractère d'autoplaçance. La résistance à la compression est fortement influencée par les méthodes de cure, sept jours de cure dans l'eau puis suivi d'un murissement dans un climat chaud était la durée optimale pour le développement d'une meilleure résistance à la compression et ceci quelque soit le type de liant et le rapport E/L. En outre, il existe de très bonnes corrélations entre l'UPV et la résistance à la compression d'une part et entre l'IR et la résistance à la compression d'autre part. Il est également montré que le coefficient de Sorptivité des BAPs est très sensible aux conditions de durcissement. Les échantillons de BAP conservés dans l'eau présentent un faible coefficient de Sorptivité quelque soit le rapport E/L. En outre, Le climat chaud semble modifier significativement la porosité des BAPs, cependant, l'absorption d'eau est peu influencée par l'élévation de température.

Mots clés : Béton autoplaçant, Climat chaud, durée de cure initiale, Résistance à la compression, Porosité. Sorptivité, Corrélations.

Table des matières

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	II
الملخص.....	III
Abstract.....	IV
Résumé.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	VIII

Introduction Générale

Généralités.....	2
Objectifs.....	2
Plan des chapitres.....	3

Chapitre 01

Propriétés Mécaniques et Physiques des BAPs

1.1 Introduction.....	6
1.2 Conception et formulation de BAP.....	7
1.2.1 Les différents constituants d'un BAP.....	7
1.2.2 Le Ciment.....	7
1.2.3 Gravillons.....	8
1.2.4 Superplastifiants.....	8
1.2.5 L'agent de viscosité.....	9
1.2.6 Additions fines.....	10
1.3 Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais.....	10
1.3.1 Essais de caractérisations de la pâte.....	10
1.3.2 Essai au mini cône (NF EN 196-1).....	11
1.3.3 Mobilité en milieu non confiné.....	11
1.3.3.1 Essai d'étalement.....	11
1.3.3.2 Essai des anneaux japonais (J- RING).....	12
1.3.3.4 Essai de la boîte en L (L-box test).....	13
1.3.3.5 Essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel ».....	13
1.3.3.6 Essai de stabilité au tamis.....	14

1.4 Rhéologie du béton	16
1.4.1 Caractéristiques rhéologiques d'un BAP	16
1.4.2 La rhéologie du béton frais	16
1.4.2.1 Le seuil de cisaillement (τ_0)	16
1.4.2.2 La viscosité plastique(μ_p)	17
1.4.3 Comportement rhéologique et modèle multi-échelles	17
1.4.3.1 Fluides newtonien	18
1.4.3.2 Fluides Binghamien	18
1.5 Formulation des BAP	19
1.5.1 Approche japonaise.....	19
1.5.2 Approche LCPC (basé sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires)	22
1.5.3 Approche suédoise	22
1.5.4 Méthode basé sur le plan d'expérience	23
1.6 Propriétés des BAP à l'état durci.....	23
1.6.1. Résistance mécaniques	23
1.6.2 Module d'élasticité.....	24
1.7 Conclusion.....	25

Chapitre 02

Effet du Climat Chaud sur les propriétés des BAPs

2.1 Introduction.....	27
2.2 Climat chaud	27
2.3 Facteurs climatiques	28
2.3.1 Température	28
2.3.2 Humidité relative (HR)	28
2.2.3. Rayonnement solaire et précipitations	29
2.2.4 Le vent	29
2.2.5 Evaporation	30
2.3 Changement climatiques de la région méditerranéenne	30
2.4 Effet de la température sur les propriétés du BAP.....	32
2.4.1 Etat frai	32
2.4.2 Etat durci.....	37
2.4.2.1 la résistance à la compression	37

2.4.2.2 Module d'élasticité	40
2.6 Propriétés de transport et durabilité	42
2.6.1 Porosité totale	42
2.6.2 Influence du mode de cure sur la porosité totale.....	44
2.6.3 Absorption capillaire.....	46
2.6.4 Absorption d'eau.....	48
2.6.5 Perméabilité	49
2.7 Conclusion	50

Chapitre 3

Matériaux et méthodes d'essais

3.1 Introduction	52
3.2 Les constituants de base	52
3.2.1 Le ciment	52
3.2.2 Filler calcaire	52
3.2.3 Pouzzolane	53
3.2.4 Phase granulaire	54
3.2.5 Superplastifiant	55
3.3 Formulation du mortier autoplaçant (MAP) et BAP	55
3.4 Déroulement des essais.....	60
3.4.1 Préparation des constituants en fonction de la température.....	60
3.4.2 Mise en place des constituants	61
3.4.3 Malaxage et l'évolution de la fluidité avec le temps en climat chaud	61
3.5 Essais à l'état frais	62
3.5.1 Etalement	62
3.5.2 J-Ring.....	62
3.5.3 V-Funnel	62
3.5.4 Boite en L.....	64
3.5.5 Stabilité au tamis.....	64
3.5.6 Masse volumique apparente.....	65
3.6 Préparation des éprouvettes	65
3.7 Caractérisation à l'état durci.....	66
3.7.1 Essais mécaniques.....	66
3.7.2 Essais non destructifs (CND)	67

3.7.2.1 <i>Rebond (marteau de rebondissement de Schmidt)</i>	67
a) Principe fondamental	67
b) Description de l'appareil	68
c) Procédé de mesurage	68
3.7.2.2 <i>Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonore)</i>	69
a) Procédé de mesurage	70
3.8 Module d'élasticité	71
3.9 Essais de durabilité	71
3.9.1 Absorption capillaire.....	71
3.9.2 Porosité accessible à l'eau	73
3.9.3 Absorption d'eau.....	73
3.10 Conclusion	76

Chapitre 4

Etude de la Rhéologie des BAPs

4.1 Introduction.....	78
4.2 Résultats des essais d'ouvrabilité	78
4.2.1 Essai d'étalement	78
4.2.2 Essais J-Ring.....	80
4.2.3 Essai V-Funnel.....	81
4.2.4 Ecoulement à la boîte en L.....	82
4.2.5 Stabilité au tamis.....	83
4.2.6 Corrélations entre les grandeurs de caractérisation de BAP	84
4.3 Fluidité des BAPs.....	86
4.3.1 Maintient de l'ouvrabilité (Slump Flow)	86
4.3.2 Evolution du temps d'écoulement T500 en fonction du temps et par temps chaud .	87
4.3.3 Evolution du temps V-funnel par temps chaud.....	88
4.4 Etude de la rhéologie des BAPs utilisés.....	89
4.3.1 Corrélation entre grandeurs spécifiques expérimentales (τ_0 , μ_p) et caractéristiques rhéologiques des bétons	92
4.4 Conclusion.....	97

Chapitre 5

Résultats des essais mécaniques

5.1 Introduction.....	99
5.2 Effets de la période de cure initiale sur la résistance en compression des BAPs	99
5.3 Essais non destructifs CND pour différentes BAPs en fonction de la période de cure humide	108
5.3.1 Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV)	108
5.3.2 Indice de rebondissement	112
5.3.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonore ..	116
5.3.4 Relation entre la résistance mécanique et l'indice de rebondissement	118
5.4 Module d'élasticité des BAP en fonction du mode de cure	120
5.4.1 Corrélation entre le module d'élasticité dynamique E_d et la résistance à la compression	123
5.5 Conclusion.....	125

Chapitre 6

Durabilité des bétons autoplaçants

6.1 Introduction.....	127
6.2 Effet de la durée de cure initiale sur le coefficient de Sorptivité des BAPs	127
6.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la Sorptivité	132
6.4 L'effet de la durée de cure humide sur la Porosité des BAPs	133
6.5 Corrélation entre la résistance à la compression et la Porosité	136
6.6 Absorption d'eau	136
6.7 Corrélation entre la résistance à la compression et l'absorption.....	138
6.8 Conclusion.....	140
Conclusions générales et recommandations.....	142
Références bibliographiques.....	145

Liste des Figures

Figure 1.1 Comparaison du chantier de construction utilisant le béton vibré traditionnel et le béton autoplaçant.....	6
Figure 1.2 Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.....	8
Figure 1.3 Représentation de particules de ciment flocculées et dispersées.....	9
Figure 1.4 Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton.....	10
Figure 1.5 Essai au mini cône	11
Figure 1.6 Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	12
Figure 1.7 A gauche J-Ring + cône d'Abrams et a droite essai J-Ring.	13
Figure 1.8 Essai L-Box	13
Figure 1.9 Équipement V-funnel.....	14
Figure 1.10 Essai de stabilité au tamis	15
Figure 1.11 Les différents types d'écoulement de la matière	17
Figure 1.12 Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton.....	19
Figure 1.13 Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité	20
Figure 1.14 Cône pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers.	20
Figure 1.15 Relation entre les termes T_m et R_m pour différents dosages en superplastifiant (Sp/P) et différents rapports volumiques eau sur poudre (V_w/v_p).	21
Figure 1.16 Évolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un béton vibré	24
Figure 2.1 ACI Abacus permettant d'évaluer le taux d'évaporation à la surface d'un béton...	30
Figure 2.2 Effet de différents superplastifiants sur la perte d'étalement du BAP soumis à diverses températures et temps de mélange : PC (a-0.8% et b-1.0%), ML(c-2.4% et d-2.8%) et NS(e-1.6% et f-1.8%).	33
Figure 2.3 Effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale :(a) l'étalement, (b) temps d'écoulement à l'entonnoir en V (b) et (c) pourcentage de remplissage à la boîte en L.....	34
Figure 2.4 Effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes après le malaxage (Mélange A à gauche, Mélange B à droite)	35
Figure 2.5 Variation du dosage du superplastifiant à différents points climatiques	36
Figure 2.6 Temps V- Funnel, viscosité relative à différents température.....	36
Figure 2.7 Evolution des résistances à la compression en fonction des moyens de maintenir.38	38
Figure 2.8 pendant une journée la résistance à la compression augmente avec une augmentation de la température de séchage mais à 28 jours elle diminue avec l'augmentation de la température de séchage.....	39
Figure 2.9 La résistance à la compression en fonction de l'humidité relative.....	39
Figure 2.10 Module d'élasticité en fonction de la résistance à compression.....	40
Figure 2.11 Module d'élasticité en fonction de la résistance à compression.	41

Figure 2.12 Evolution des modules d'élasticité en fonction de la température initiale du béton, des moyens pour maintenir l'ouvrabilité lorsque la température initiale est de 50°C et du mode de conservation.....	41
Figure 2.13 Relation entre résistance, perméabilité et porosité du béton	42
Figure 2.14 Prosimètre au mercure de deux pâtes de ciment conservées dans l'eau pendant 7 jours.....	43
Figure 2.15 Porosité totale de BAP conservés à 20°C, 60°C et 80°C.....	44
Figure 2.16 Porosité à l'eau des échantillons selon la cure pour tous les teneurs de laitier.....	45
Figure 2.17 Porosité à l'eau des échantillons en fonction de la cure et de la teneur de laitier.....	45
Figure 2.18 Valeurs de la porosité accessible à l'eau (moyenne et dispersion) obtenues pour les différents BAP.	46
Figure 2.19 Influence de la teneur du Cendre Volante (CV) sur la Sorptivité (SP=0.7%).....	47
Figure 2.20 Relation entre l'humidité relative et les pores partiellement vides dans la pâte de ciment.....	48
Figure 2.21 Degré de saturation après 90 j au contact de l'eau en fonction de E/C.....	49
Figure 3.1 Analyse par diffraction aux rayons X du calcaire.....	53
Figure 3.2 Analyse par diffraction X de pouzzolane	54
Figure 3.3 Granulométrie des granulats fins et grossiers	54
Figure 3.4 Dimensions du cône et l'entonnoir à mortier.....	56
Figure 3.5 Relation entre les termes Γ_m et R_m pour différents dosages en superplastifiant (Sp /P) et différents rapports volumiques eau sur poudre (V_e /V_p).....	57
Figure 3.6 Organigramme représentatif des différentes étapes de formulation du BAP par la méthode Japonaise.....	60
Figure 3.7 Essais de caractérisation du BAP.....	63
Figure 3.8 Essai a la boîte en L	64
Figure 3.9 Tests du BAP à d'état frais	65
Figure 3.10 Machine de compression	67
Figure 3.11 Mesures non destructifs.	69
Figure 3.12 Schéma de l'essai d'absorption de l'eau.....	72
Figure 3.13 Les étapes d'essais d'absorption.....	72
Figure 3.14 Les étapes d'essai de Porosité accessible à l'eau : a) étuvage 105°C, b) immersion dans l'eau, c) pesage dans l'eau, d) contrôle de la température d'ébullition.	74
Figure 3.15 Organigramme représentatif des différents Essais de caractérisation de BAP.....	75
Figure 3.16 Organigramme représentatif des différents Essais sur BAP à l'état durci	76
Figure 4.1 Essais d'étalement pour les deux types de ciment.....	79
Figure 4.2 Temps pour atteint un diamètre de 500 mm	80
Figure 4.3 Essais J-Ring pour les deux types de ciment	81
Figure 4.4 Temps V-Funnel mesuré immédiatement après l'essai d'étalement.	82
Figure 4.5 Rapports H_2/H_1 obtenu à la boîte en L immédiatement après l'essai V-funnel.....	82
Figure 4.6 Pourcentage de laitance 15 mn après la fin de malaxage	83

Figure 4.7 Relation entre l'étalement et le temps T_{500}	84
Figure 4.8 Relation entre l'étalement et le temps V-Funnel	85
Figure 4.9 Corrélation entre l'étalement (slump flow) et l'écoulement dans le milieu confiné (J-Ring).....	86
Figure 4.10 Evolution d'étalement (Slump Flow) en fonction du temps	87
Figure 4.11 Evolution du temps d'écoulement T_{500} en fonction du temps.	88
Figure 4.12 L'étalement à 40 °C, a) à la fin de malaxage et b) après 45 min.....	88
Figure 4.13 Evolution du temps V-Funnel à 40°C.....	89
Figure 4.14 Corrélation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement T_v	92
Figure 4.15 Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement T_v	92
Figure 4.16 Corrélation entre la viscosité plastique et l'étalement.	94
Figure 4.17 Corrélation entre la viscosité plastique et l'étalement.	95
Figure 4.18 Corrélation entre la viscosité plastique et le temps T_{500}	95
Figure 4.19 Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps T_{500}	96
Figure 4.20 Corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.	96

Figure 5.1 Résistance à la compression des BAPs en fonction de la durée de cure initiale et le rapport E/L (CEMII-A-C)	101
Figure 5.2 Résistance à la compression des BAP en fonction de la durée de cure initiale et le rapport E/L (CEMII-A-P).....	102
Figure 5.3 Température moyenne max et min de la région de Chlef.....	105
Figure 5.4 Humidité relative max et min de la région de Chlef.....	105
Figure 5.5 La résistance à la compression optimale en fonction de la durée de cure initiale (ciment CEMII-A-C).....	106
Figure 5.6 La résistance à la compression optimale en fonction de la durée de cure initiale (ciment CEMII-A-P)	108
Figure 5.7 La vitesse ultrasonore en fonction du temps et la durée de cure initiale (CEMII-A-C).....	109
Figure 5.8 La vitesse ultrasonore en fonction du temps et la durée de cure initiale (CEMII-A-P)	111
Figure 5.9 Indice de rebondissement des BAP en fonction du mode de cure (CEMII-A-C).	114
Figure 5.10 Indice de rebondissement des BAP en fonction du mode de cure (CEMII-A-P).....	115
Figure 5.11 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique	116
Figure 5.12 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique	118
Figure 5.13 Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement.	119
Figure 5.14 Module d'élasticité des BAP (ciment CEMII-A-C).....	121
Figure 5.15 Module d'élasticité des BAP (ciment CEMII-A-P).....	122
Figure 5.16 Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression	124

Figure 6.1 Sorptivité des BAP en fonction de la durée de cure initiale (ciment CEMII-A-C)	129
Figure 6.2 Sorptivité des BAP en fonction de la durée de cure initiale (ciment CEMII-A-P)	130

Figure 6.3 Corrélation entre le coefficient de Sorptivité et la résistance à la compression à 90jours.....	132
Figure 6.4 La porosité totale du mélange de BAP en fonction de la durée de cure humide initiale (CEMII-A-C) à 28 jours.....	135
Figure 6.5 La porosité totale du mélange de BAP en fonction de la durée de cure humide initiale (CEMII-A-P) à 28jours	135
Figure 6.6 Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité.....	136
Figure 6.7 Absorption d'eau des BAPs en fonction de la durée de cure initiale (CEMII-A-C)	138
Figure 6.8 Absorption d'eau des BAPs en fonction de la durée de cure initiale (CEMII-A-P)	138
Figure 6.9 Corrélation entre l'absorption et la résistance à la compression	139
Figure 6.10 Corrélation entre l'absorption et la Porosité.....	139

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Utilité des différents essais rhéologiques.....	15
Tableau 1.2 Paramètres rhéologiques de la pate de ciment, du mortier et du béton	18
Tableau 2.1 Composition des mélanges.	34
Tableau 2.2 Données climatique.	35
Tableau 3.1 Les propriétés physico-chimiques des ciments composés (Algérie).....	52
Tableau 3.2 Analyse chimique de la Pouzzolane	53
Tableau 3.3 Propriétés du sable et gravier utilisé.....	55
Tableau 3.4 Propriétés du superplastifiant SIKA Viscocrete Tempo 12.....	55
Tableau 3.5 Composition des BAPs.	58
Tableau 3.6 Classe d'étalement.....	62
Tableau 3.7 Classes de temps d'écoulement T500.....	62
Tableau 3.8 Classes d'aptitude à l'écoulement - boîte en L.	64
Tableau 3.9 Classe de résistance à la ségrégation.	65
Tableau 3.10 Modes de cure des trois BAP.....	66
Tableau 3.11 Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion.....	70
Tableau 4.1 Propriétés des BAPs à l'état frais.	78
Tableau 4.2 Résultats des paramètres rhéologiques mesurés par les équations empiriques. ...	91
Tableau 4.3 Valeurs des grandeurs rhéologique de la littérature.	93
Tableau 5.1 Valeurs de la résistance à la compression (MPa) du ciment (CEMII-A-C)	100
Tableau 5.2 Valeurs de la résistance à la compression (MPa) du ciment (CEMII-A-P).....	100
Tableau 5.3 Valeurs de l'UPV des BAPs (CEMII-A-C).....	109
Tableau 5.4 Valeurs de l'UPV des BAPs (CEMII-A-P).....	109
Tableau 5.5 Valeurs de l'indice de rebondissement en fonction de la durée de cure initiale (CEMII-A-C).....	113
Tableau 5.6 Valeurs de l'indice de rebondissement en fonction de la durée de cure initiale (CEMII-A-P).	113
Tableau 5.7 Comparaison des relations entre la résistance à la compression et l'UPV.....	116
Tableau 5.8 Equations des corrélations entre la résistance à la compression et l'UPV des auteurs.....	117
Tableau 5.9 Comparaison des relations entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement.	119
Tableau 5.10 Module d'élasticité des BAPs à la base du ciment CEMII-A-C	120
Tableau 5.11 Module d'élasticité des BAPs à la base du ciment CEMII-A-P.....	120

Tableau 6.1 Coefficient de Sorptivité du ciment CEMII-A-C	127
Tableau 6.2 Coefficient de Sorptivité du ciment CEMII-A-P.....	128
Tableau 6.3 Porosité des mélanges de BAP à base du ciment CEMII-A-C à 28jours	133
Tableau 6.4 Porosité des mélanges de BAP à base du ciment CEMII-A-P à 28jours.....	133
Tableau 6.5 Les valeurs d'absorption d'eau des BAP (CEMII-A-C).....	137
Tableau 6.6 Les valeurs d'absorption d'eau des BAP (CEMII-A-P).....	137

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 sont les premiers qui ont développé un béton très fluide qui ne nécessite pas la mise en place des systèmes de vibration. Leur objectif était de supprimer la ségrégation du béton et les opérations coûteuses liées à la vibration afin d'accroître la productivité du chantier.

Les premières études effectuées sur les BAPs visaient essentiellement à mettre au point des formulations qui répondent à des exigences de fluidité. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature ([Sedran 1999](#) ; [Sonebi et al. 1999](#); [Bouzoubaa et al. 2000](#), [Violeta 2003](#)) soulignent que les BAP contiennent un volume de fines plus important que les bétons ordinaires et incorporent des adjuvants tels que les superplastifiants et parfois un agent de viscosité, le volume de pâte dans les BAP est plus élevée que dans le béton ordinaire, la taille maximale des granulats est limitée à 20 millimètres ([AUGC 2008](#)). Une grande partie des travaux de recherche concerne l'évaluation des propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais, cependant, ce qui est d'un intérêt capital pour les concepteurs des structures c'est les propriétés à l'état durci, comme la résistance à la compression, le module d'élasticité, le retrait, le fluage, la vitesse ultrasonique (UVP) ([Domone 2007](#)). Une des différences les plus importantes entre le BAP et le béton ordinaire et l'incorporation des ajouts minéraux, plusieurs chercheurs ont étudié l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés des BAP, ([Mucteba et al. 2011](#)). [Ferhat et al. \(2013\)](#) ont constaté que l'augmentation du pourcentage de remplacement de la fumée de silice entraîne une augmentation de la résistance à la compression, le BAP qui contient une teneur de 15% de fumée de silice donne de meilleures résistances à la compression. Les bétons conservés dans l'eau donnent des résistances à la compression plus élevées, ainsi, que le durcissement dans l'air a montré une diminution de la résistance à la compression pour tous les BAP. D'autres chercheurs ([Zhao et al. 2012](#), [Bonavetti et al. 2000](#)) ont montré que le développement de la résistance à la compression et à la flexion des BAP soumis aux différentes durées de cure initiale varie en fonction de la durée de cure initiale. Une période de cure initiale de 7 jours développe des résistances à la compression et à la flexion maximale. [Hans \(2006\)](#) a montré que le traitement thermique des BAPs influe sur la taille des pores des BAP. D'après [Shirley \(1980\)](#) pendant les mois chaud de l'année et en particulier pendant l'étape de durcissement il existe une grande variation thermique qui provoque des contraintes élevées dans le béton. Le taux d'évaporation de l'eau augmente quand la température de l'air augmente, par exemple, une augmentation de 10 °C à 20 °C

entraîne un taux de d'évaporation du béton doublé. Une diminution de l'humidité relative de 90% à 50%, sans changement de toute autre condition, augmente de cinq fois le taux d'évaporation de l'eau des surfaces exposées (Shirley 1980). Le taux de mouvement de l'air est probablement le facteur qui peut créer plus de problèmes pendant le bétonnage par temps chaud et sec. D'après Shirley (1980), le taux d'évaporation de l'eau, pour un vent de 15 kilomètres par heure, est environ quatre fois plus que le taux d'évaporation pour une vitesse nulle.

Il est à noter que les effets des méthodes de cure sur l'évolution des propriétés de BAP sont encore une question discutée. La présente étude s'intéresse à l'analyse des effets des méthodes de cures adéquates sur les propriétés et le comportement des BAPs à l'état frais et durci.

Ce travail tente de répondre à plusieurs questions dont certaines concernent la durée de cure humide initiale adéquate pour un BAP exposé aux températures élevées du climat chaud, ainsi que l'effet du climat sur les propriétés mécaniques (résistances à la compression, vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV), indice de rebondissement (IR) et le modules d'élasticité dynamique) et sur la durabilité, plus précisément les propriétés de transferts (porosité accessible à l'eau, absorption capillaire, absorption d'eau).

La première partie de cette thèse est consacrée à l'étude bibliographique qui est composée de deux chapitres. Le premier chapitre fait l'objet de la présentation des différentes méthodes de formulation et de caractérisation des BAP. Les caractéristiques d'un climat chaud et ces effets sur les propriétés et le comportement des bétons, à l'état frais et à l'état durci, ont été discutées dans le chapitre 2.

La deuxième partie décrit les matériaux utilisés et les formulations du BAP étudiés dans cette thèse. En utilisant la méthode Japonaise, nous avons déterminé six formulations qui couvrent trois différentes classes de résistances avec trois rapports E/L (0.32, 0.38 et 0.44) et deux types de ciments. Pour la même classe de résistance mécanique, les bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire. Les méthodes d'essai de mesure de toutes les grandeurs physico-mécaniques (résistance à la compression, UPV, IR et module d'élasticité) et de durabilité (Porosité accessible à l'eau, Sorptivité et l'absorption d'eau) ont été présentées dans ce chapitre.

La troisième partie dédiée à la présentation et à la discussion des résultats est composée de trois chapitres. Le chapitre quatre a traité la rhéologie des BAPs confectionnés, ainsi que le temps du maintien de l'autoplaçance des BAPs par temps chaud. Les effets du climat chaud sur les propriétés mécaniques des BAPs à l'état durci (résistances en compression, la vitesse ultrasonique (UPV), l'indice de rebondissement (IR) et le module d'élasticité dynamique) ont été présentés et discutés dans le cinquième chapitre. Tandis que, le sixième chapitre est consacré à la discussion des résultats relatifs aux propriétés de transferts (Porosité accessible à l'eau, Sorptivité et l'absorption d'eau) des BAPs.

Enfin, la thèse se termine par une conclusion récapitulant les principaux résultats de cette recherche et donne des perspectives pour les futurs travaux de recherche.

Chapitre 1:

ÉTUDES DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET
PHYSIQUES DES BAPS

1.1 Introduction

Le béton auto plaçant (BAP) ou en anglais (SCC) (Self-Compacting Concrete) est un béton qui peut être mis en place uniquement sous l'action de la gravité, sans besoin de vibration externe. Il est caractérisé par une grande déformabilité et une bonne stabilité dynamique et statique. Les BAP sont été développés par le professeur [Okamura](#) à la fin des années 1980, leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre ([Figure 1.1](#)). Depuis, les grandes groupes industriels japonais ont commercialisés les BAPs vu les intérêts techno-économiques qu'ils présentent.

- Une diminution du temps du personnel lors de la mise en place du béton en chanté ;
- Obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation;
- Offre de garantie en résultats de matière de qualité de parement brut;
- Possibilité de fabriquer des structures des formes hypercomplexes, cette nouveauté permet aux architectes et aux maîtres d'ouvrages la possibilité de créativité;
- Bonne pompabilité permettant le transport sur des plus longues distances;
- Réduction importante des nuisances sonores sur le chantier du fait de l'absence de vibration.



Béton traditionnel Vibré



Béton autoplaçant

Figure 1.1: Comparaison d'un chantier de construction utilisant le béton traditionnel vibré et le béton autoplaçant ([AyeMonn 2007](#)).

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés particulières sont évaluées par différents tests d'étalement, de stabilité et de ressuage.

La formulation des bétons autoplaçants se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante de volume de pâte, de manière à améliorer la fluidité du béton en évitant l'effet de voûte entre les gros granulats. Les adjuvants peuvent être des superplastifiants hauts réducteurs d'eau et des agents colloïdaux. Les superplastifiants augmentent la maniabilité du béton, leur dosage est limité pour éviter les risques de ségrégation et de ressuage. Les agents colloïdaux peuvent être utilisés pour limiter l'effet négatif des superplastifiants, ou plus généralement pour améliorer la stabilité des bétons fluides.

1.2 Conception et formulation de BAP

1.2.1 Les différents constituants d'un BAP

Formuler un BAP, c'est trouver un arrangement optimal des divers constituants répondant à un cahier de charge donné. Ce dernier concerne la résistance à la compression du BAP à 28 jours, sa classe d'exposition, son ouvrabilité, ainsi que d'autres propriétés qui concernent des chantiers spécifiques, comme, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimale, pour répondre à ces conditions de cahier de charge il faut chercher une solution optimale, qui implique un faible coût.

1.2.2 Le Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%.

1.2.3 Gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats roulés ou concassés pour la formulation du BAP. En général, le diamètre maximal D_{\max} des gravillons dans un BAP est inférieur à 20 mm. Les risques de blocage, pour un confinement donné, augmentent lorsque D_{\max} augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon, et aussi pour réduire les frictions entre les granulats. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et, donc, de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 dans les BAPs.

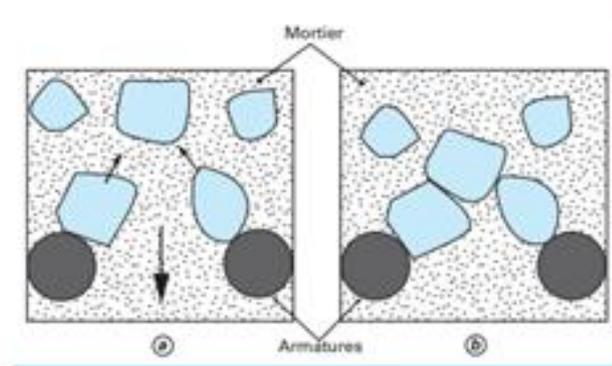


Figure 1.2: Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.

1.2.4 Superplastifiants

Les superplastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction. Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang. Ils font partie des adjuvants pour béton, lesquels sont définis, selon la norme [EN 934-2](#), comme des matériaux qui sont ajoutés au béton pendant le processus de malaxage, dans des quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, afin de modifier ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

L'apparition des bétons auto plaçant est fortement liée au progrès réalisés dans le domaine des adjuvants est plus particulièrement celui des superplastifiants, pendant le gâchage une grande quantité d'eau est emprisonné entre les particules. Afin d'obtenir une fluidité suffisante, les superplastifiants sont souvent utilisés. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérations comme le montre la [Figure 1.3](#).

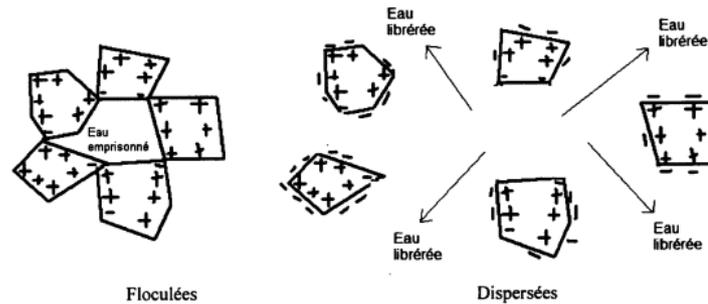


Figure1.3: Représentation de particules de ciment floculées et dispersées.

1.2.5 Agent de viscosité

Un agent de viscosité est un produit soluble dans l'eau qui en augmente la viscosité. Les agents de viscosité sont composés de molécules de longues chaînes de polymères qui adhèrent à la périphérie des molécules d'eau et adsorbent une partie de cette eau. Les fonctions secondaires de ces agents sont très différentes selon le type d'agent de viscosité employé (Kawai1987).

Dans la classification donnée par Kawai (1987), les agents de viscosité se divisent comme suit :

- les polymères naturels, incluant l'amidon, les protéines de plantes, la gomme Welan et toutes les autres gommes naturelles ;
- les polymères semi synthétiques, comme les amidons décomposés et leurs dérivés, les éthers de cellulose comme l'hydroxypropylméthyle cellulose (HPMC), l'hydroxyde éthyle cellulose (HEC), et le carboxyle méthyle cellulose (CMC) ;
- les polymères synthétiques, principalement les polyéthers (polyéthylène glycol), les polyacrylamides, et ceux basé sur le vinyle (Alcool polyvinylique).

Selon (Khayat1998) il y a trois types de mode d'action.

- ✓ Adsorption : les molécules d'agent colloïdal adsorbent l'eau et prennent d'expansion ;
- ✓ Association : les différentes particules développent des liaisons par site des forces de surface de van der Waals et des ponts hydrogène;
- ✓ Chevauchement : à concentration élevée, les polymères se manifestent avec un chevauchement.

1.2.6 Additions fines

Afin d'assurer une fluidité importante, une faible ségrégation, un ressuage négligeable et un arrangement granulaire optimale, il faut introduire dans la formulation des BAPs de forte teneur en fines minérales ($\phi \leq 63\mu\text{m}$) : filler calcaires, cendre volantes, laitier, Pouzzolane. Les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité.

Certains ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation. [Billberg \(2001\)](#) a montré que la diminution de la taille des fillers réduit le seuil de cisaillement des BAP et rendre la pâte plus épaisse [Figure 1.4](#).

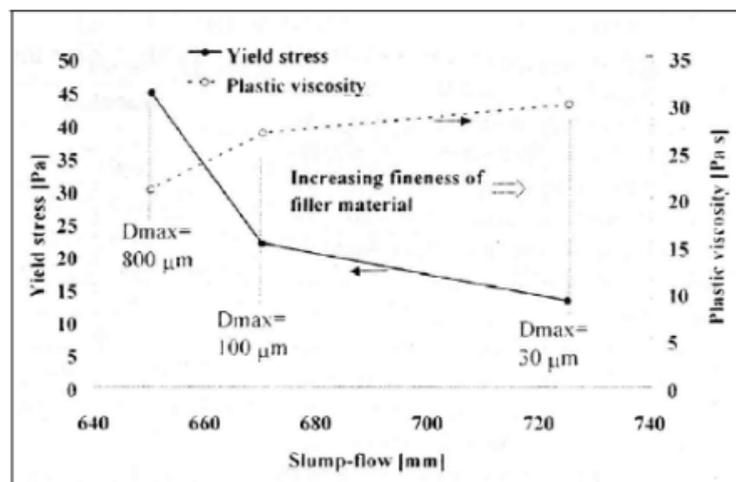


Figure 1.4: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton ([Billberg 2001](#)).

1.3 Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais

Pour comprendre le comportement du béton, il faut connaître celui de la pâte qui le compose. Celle-ci est constituée du ciment, des additions, de l'eau et des adjuvants.

1.3.1 Essai au mini cône (NF EN 196-1)

L'appareil se compose d'un moule tronconique creuse de 60 mm de hauteur, un diamètre de haut 70 mm et du bas 100mm. Le cône est placé au centre d'une plaque en acier, et est rempli de pâte de ciment. Le cône est soulevé et la pâte s'écoule sur la table. Le diamètre moyen (D_{moyen}) de l'étalement est mesuré, l'étalement relatif (Γ_m) est alors calculé comme suit :

$$\Gamma_m = \frac{(d_1 \cdot d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad D_{moyen} = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ ou } d_0 = 100 \text{ mm}$$

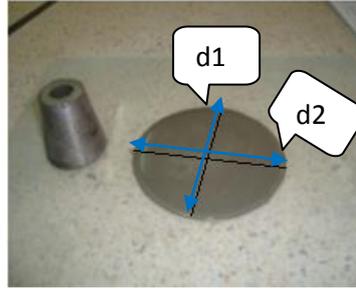


Figure 1.5: Essai au mini cône.

Trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » (AFGC2000). Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence pour valider une formule de BAP.

L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques:

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

1.3.2 Mobilité en milieu non confiné

1.3.2.1 Essai d'étalement

C'est l'essai au cône d'Abrams qui permet de donner une indication sur la mobilité du béton en milieu non confiné. A travers cet essai on obtient l'étalement (SF) (Slump flow). Il représente le diamètre de la galette obtenir suite au soulèvement du cône d'Abrams après un temps suffisamment long. L'étalement est fonction du seuil d'écoulement du béton, contrainte minimale au-dessous de laquelle le béton ne s'écoule pas. Les valeurs d'étalement préconisés pour un BAP (NF EN 206-1) se situent entre 600mm et 800mm. Ainsi trois classes d'étalement ont été définies.

- **SF1** l'étalement compris entre 550 et 650mm,
- **SF2** l'étalement compris entre 660 et 750mm,
- **SF3** l'étalement compris entre 760 et 800mm.

Les classes d'étalement **SF1**, **SF2** et **SF3** sont utilisés pour la réalisation d'éléments faiblement ou fortement armés. Ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre

d'une galette de 500mm de diamètre (T_{500}). Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Elle permet, également, de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 600 à 750 mm est en général visée pour obtenir un BAP.

L'essai au cône d'Abrams (Fig. 1.6) permet, également, d'estimer visuellement le risque de ségrégation statique du béton par effet de gravité et qui se manifeste par l'accumulation des gros grains au centre de la galette et par la formation d'une auréole de la laitance à ses extrémités.



Figure 1.6: Essai d'étalement au cône d'Abrams.

1.3.2.2 Essai des anneaux japonais (J- RING)

Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié (Brunetaud et al. 2005). On utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (Figure 1.7). Après le soulèvement du cône rempli et l'écoulement du béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai: le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm (T_{500}) en secondes (Sedran1995).



Figure 1.7: A gauche J-Ring + cône d'Abrams et à droite essai J-Ring.

1.3.2.4 Essai de la boîte en L (L-box test)

Cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. La partie verticale est remplie de béton en une seule fois (Fig. 1.8). Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (3 barres Ø12 espacées de 39 mm) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres) (AFGC2000). Après écoulement, on mesure la hauteur dans la partie verticale (H_1) et celle de la partie horizontale (H_2) et on calcule le taux de remplissage final (H_2/H_1). Une valeur de ce rapport supérieure à 0.8 traduit un bon écoulement du BAP en milieu confiné. La viscosité du BAP en milieu confiné peut être mesurée par le temps d'écoulement.

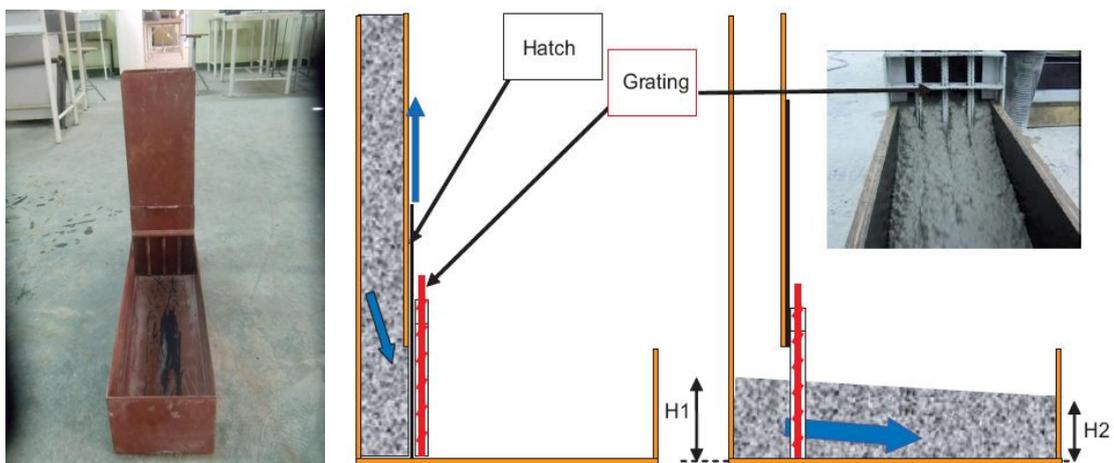


Figure 1.8: Essai L-Box.

1.3.2.5 Essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant (RILEM 2001): il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en

dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe (Figure 1.9).

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante, un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement, pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue. Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes (ENFRAC 2005). Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisant.

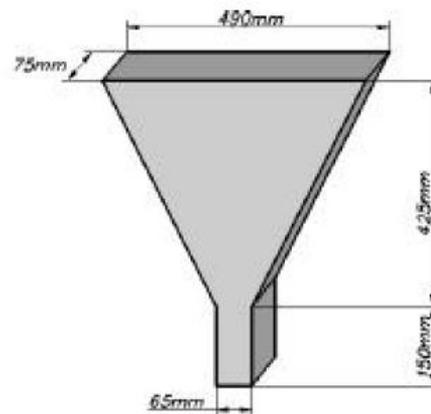


Figure 1.9: Équipement V-funnel.

1.3.2.6 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure 1.10). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier (Tutcry 2004).

À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Un

pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$\text{Laitance} = (\text{poids de laitance} / \text{poids de l'échantillon}) \times 100$$

Deux classes sont définies (NF EN 206-9).

SR1 : Laitance \leq 20%

SR2 : Laitance \leq 15%

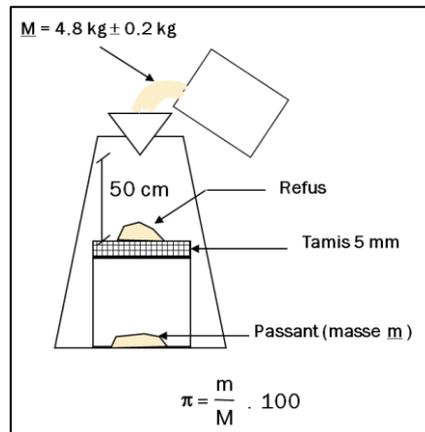


Figure1.10: Essai de stabilité au tamis.

Les différences de tailles et de densité des particules dans le béton peuvent amorcer la migration des plus grosses particules vers le bas par action de la pesanteur. La ségrégation augmente avec la maniabilité, la diminution de la teneur en ciment, la taille et la teneur en granulats ainsi que la technique de coulage (Laurent 2002). Pour la minimiser, nous pouvons optimiser le squelette granulaire du béton et utiliser un agent de viscosité afin d'augmenter la viscosité du mélange.

Tableau1.1: Utilité des différents essais rhéologiques (EN 206-9).

Méthode	Remplissage	Viscosité	Passage	Ségrégation
Étalement	étalement	T_{50}		
V-funnel		Temps		
J-ring			étalement	
Boîte en L			Rapport H1/H2	
Stabilité rhéologie	Seuil	viscosité		% de laitance

1.4 Rhéologie du béton

1.4.1 Caractéristiques rhéologiques d'un BAP

La rhéologie est la science des déformations et de l'écoulement des matériaux. On dit qu'un élément est en écoulement si le degré de déformation change en fonction du temps (Khayat1992). Plus précisément la rhéologie est une branche de la science physique qui étudie l'écoulement ou la déformation d'un corps sous l'effet des contraintes appliquées, en prenant en compte la vitesse d'application de ces contraintes et leur variation au cours du temps (Yahia 2012). On dit qu'un corps se déforme lorsque nous lui appliquons une force en faisant changer sa forme et sa dimension et qu'un corps coule à une vitesse déterminée, si le degré de déformation change continuellement avec le temps (Huang 2006).

Des chercheurs considèrent de plus en plus l'application de cette science comme l'un des axes fondamentaux pour la conception de nouveaux produits cimentaires et le contrôle des bétons existants.

Pour décrire le comportement du béton en face de son écoulement, certains termes comme la fluidité, l'étalement, la cohésion ont été utilisés. A titre d'exemple, les essais utilisés habituellement pour évaluer l'étalement pour le BAP donnent des valeurs relatives. Nous pouvons alors avoir deux BAP avec le même étalement, néanmoins ils peuvent présenter des comportements très différents lors de leurs mises en place. Pour cette raison (Tattersa 1973) a introduit la rhéologie dans l'étude des propriétés des bétons.

1.4.2 La rhéologie du béton frais

Il existe aujourd'hui des rhéomètres qui permettent de faire des mesures rhéologiques du béton, du mortier et de la pâte. Le rhéomètre est un appareil capable de mesurer le couple nécessaire à provoquer la rotation d'une hélice dans le béton à différentes vitesses pour tracer la courbe du couple résistant en fonction de la vitesse de rotation de la palette (tr/min). À partir de mesures obtenues, les deux paramètres rhéologiques permettant la caractérisation des BAPs sont le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ_p).

1.4.2.1 Le seuil de cisaillement (τ_0)

Par définition, le seuil de cisaillement est la force de cisaillement nécessaire pour amorcer l'écoulement du béton.

Le comportement rhéologique présente la maniabilité du BAP. Les paramètres rhéologiques : le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ_p) sont déterminés suite à un essai rhéologique à l'aide d'un rhéomètre à béton. En pratique (τ_0) est la contrainte de cisaillement qu'il faut appliquer pour provoquer la rotation de l'hélice de rhéomètre.

1.4.2.2 La viscosité plastique (μ_p)

La facilité et la vitesse de l'écoulement ainsi que la manière dont il s'écoule sont contrôlés par une résistance intérieure qui affecte la cohésion et la plasticité du béton. Cette résistance est connue sous le nom de viscosité plastique. La viscosité plastique dépend de la force intermoléculaire qui empêche le déplacement des particules les unes par rapport aux autres et rend l'écoulement plus difficile (Khayat1992).

1.4.3 Comportement rhéologique et modèle multi-échelles

Il existe différents modèles pour caractériser le comportement rhéologique des suspensions contenant différentes échelles de particules, le comportement le plus simple est le comportement Newtonien (Figure 1.11).

En ce qui concerne les paramètres rhéologiques des matériaux cimentaires, des valeurs de viscosité et de seuil de cisaillement ont été trouvées pour différents types de mélanges cimentaires (Tableau 1.2).

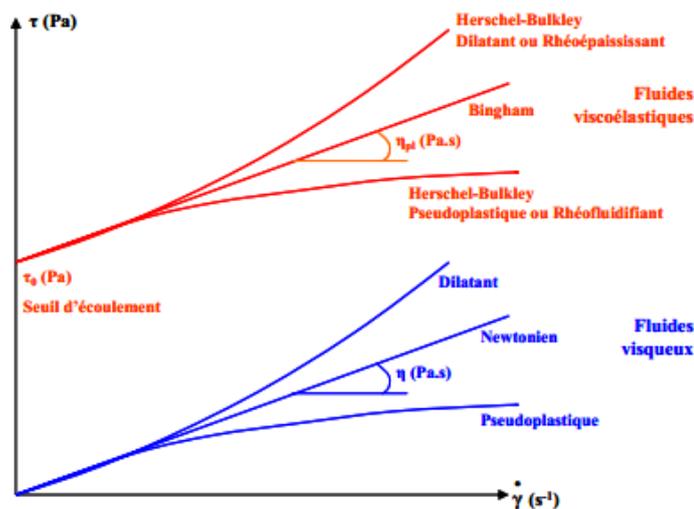


Figure 1.11: Les différents types d'écoulement de la matière.

Tableau1.2: Paramètres rhéologiques de la pâte de ciment, du mortier et du béton (Khayat 2011).

Matériaux	Pâte de ciment, coulis	Mortier	Béton fluide	Béton auto plaçant	Béton ordinaire
Seuil de cisaillement (N/m ²)	10 -100	80-400	400	50-200	500-2000
Viscosité plastique (Ns/m ²)	0.01-1	1-3	20	20-100	50-100
Rupture structurelle	Significative	Négligeable	aucune	Aucune	aucune

Les fluides rhéologiques peuvent être classés comme suivants : Fluides newtonien et Fluides non newtonien, celui-ci comporte le fluide de Bingham.

1.4.3.1 Fluides newtonien

Un fluide newtonien est un fluide qui s'écoule dès qu'une force est appliquée et sa viscosité est indépendante de la force appliquée. Le modèle rhéologique des corps newtonien (Couarrze et al. 2000) est donnée par la relation 1.1 suivante :

$$\tau = \mu\gamma \quad (1.1)$$

τ : est la contrainte de cisaillement (Pa) ;

μ : est la viscosité plastique (Pa.s) ;

γ : est le taux de cisaillement (s⁻¹).

1.4.3.2 Fluides Binghamien

Une force minimale doit être appliquée à ce genre de fluide pour amorcer son écoulement. La contrainte tangentielle correspondante à cette force est appelé le seuil de cisaillement ou le seuil d'écoulement (τ_0). Pour une contrainte de cisaillement ($\tau < \tau_0$) le matériau se comporte comme un solide. Par contre, pour une contrainte ($\tau \geq \tau_0$) son comportement se ressemble à celui d'un fluide Figure 1.12. Le modèle de Bingham est donné par l'équation 1.2:

$$\tau = \tau_0 + \mu \quad (1.2)$$

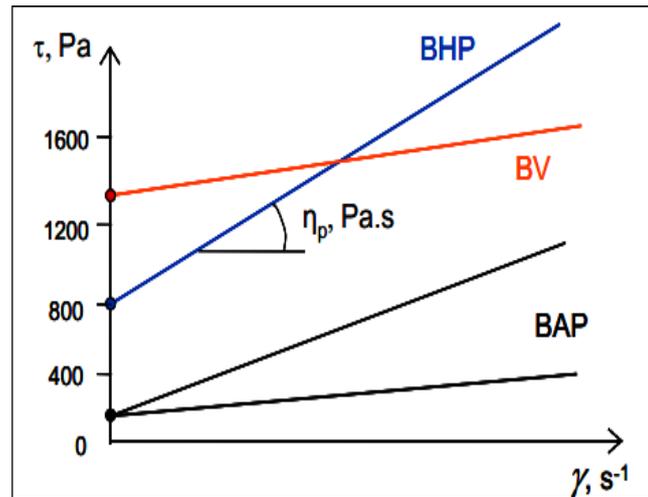


Figure 1.12: Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton.

1.5 Formulation des BAP

Formuler un BAP est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage adéquate de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répandant aux propriétés du BAP.

Il existe plusieurs variétés de matériaux à travers le monde, les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de BAP, la variété de matériaux peut conduire à des comportements différents à tous les niveaux. Plusieurs approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP (Approche japonaise, Approche CBI (suédoise), Approche LCPC).

1.5.1 Approche japonaise

C'est la première et la méthode générale de formulation, cette approche a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura (1990). En général, cette approche consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Le volume du gravier pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains+vides (Figure 1.13). Ce pourcentage permet d'éviter les

risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. L'optimisation des dosages des constituants de la pâte de ciment est donc nécessaire pour s'assurer que le mortier obtenu (en associant le volume du sable) satisfasse les critères d'ouvrabilité de l'essai d'étalement au cône d'une part, et de l'essai de l'écoulement à l'entonnoir d'autre part (Figure 1.14). Les auteurs en tirent deux grandeurs adimensionnelles:

$$\text{- L'étalement relatif } \Gamma_m = (d^2 - d_0^2)/d_0^2 \quad (1.3)$$

$$\text{- La vitesse relative d'écoulement } R_m = 10/t \quad (1.4)$$

Où d en (mm) est le diamètre final de la galette de mortier, d_0 est le diamètre inférieur du cône (100mm) et t (en s) le temps d'écoulement à l'entonnoir. Le temps Γ_m caractérise la fluidité du mortier (plus Γ_m est grand plus le mortier est fluide) tandis que le terme R_m caractérise sa viscosité (plus R_m est petit, plus la viscosité est grande). D'après Okamura (1990), il faut avoir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m=1$ pour obtenir un BAP acceptable.

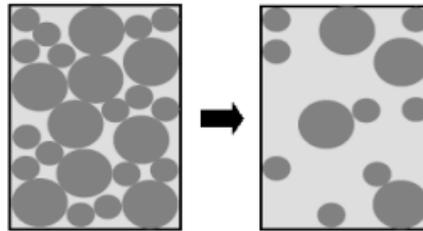


Figure 1.13: Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité



Figure 1.14: Cône pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers (Ouchi 1997).

L'expérience montre que l'on a une relation linéaire entre Γ_m et R_m pour un dosage en superplastifiant donné et quand la quantité de la teneur en eau varié (Figure 1.15). On peut donc déterminer, pour chaque dosage en superplastifiant et pour chaque combinaison de fines, le rapport R_m/Γ_m , à l'aide d'un seul mortier. Pour un rapport égal à 0.2, on ajuste alors la quantité d'eau. L'ouvrabilité et l'aptitude au remplissage du béton ainsi formulé doivent être vérifiées, à l'aide des essais présentés précédemment.

Cette méthode de formulation présente l'intérêt de sa simplicité. Il faut prendre en compte la forme de gravillon: un gravillon roulé sera plus lisse donc présentera moins de risques de blocage qu'un gravillon concassé, 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. Il est également clair que le dosage optimal en sable dépend de la nature de ce dernier et qu'une teneur de 40 % n'est qu'indicative. Bien que développée pour les bétons sans agent de viscosité (AV).

Khayat et al. (1994) ont déterminé les quantités optimales en gros granulats (concassés) et en sable capable d'améliorer la fluidité d'un BAP en présence d'un AV et d'un SP. Ces quantités optimales correspondent à une teneur de 300 l/m^3 de gros granulats composés de 70% de granulats ayant un diamètre maximum de 4 mm et 30% de granulats ayant un diamètre maximum de 20 mm et un rapport volumique de sable/pâte de 0,6.

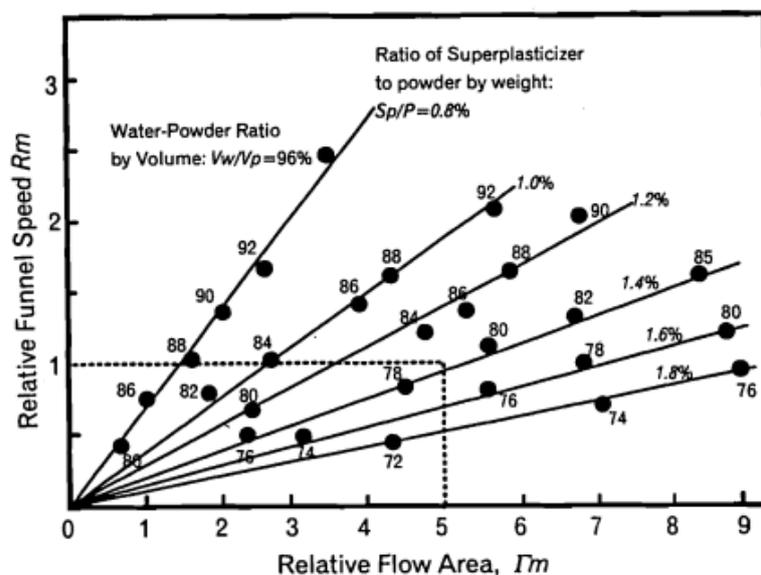


Figure 1.15: Relation entre les termes R_m et Γ_m pour différents dosages en superplastifiant (Sp/P) et différents rapports volumiques eau sur poudre (V_w/V_p) (Ouchi 1997)

1.5.2 Approche LCPC (Optimisation de la compacité du mélange)

Cette méthode a été développée au LCPC et repose sur les principes de modèle d'empilement compressible, MEC, du squelette granulaire (De Larrard et al. 1999). Elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent.

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Sedran et De Larrard (1996) ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet aussi de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAPs, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

1.5.3 Approche suédoise

Cette méthode développée par CBI (Cement Betong Institut) se caractérise par la prise en compte de ferrailages importants. Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par Ozawa et al. (1992) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures.

Pour chaque taille de granulats, il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats) et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide. Ainsi, la méthode CBI fournit une relation qui détermine le risque de blocage R_b :

$$R_b = \sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}} \quad (1.5)$$

V_i , est la proportion volumique des granulats de taille i , par rapport au volume total du béton. $V_{crit,i}$ est la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille i . Le coefficient du risque de blocage doit être inférieur ou égal à 1 pour obtenir un béton satisfaisant. En utilisant cette approche, la relation est réécrite par [Huang \(2006\)](#) comme suit:

$$R_b = (1 - V_p) \cdot \sum_i \frac{Y_i}{V_{crit,i}} \quad (1.6)$$

Avec y_i , la proportion volumique de granulats de taille i rapportée au volume total des granulats et V_p le volume de la pâte dans un volume unité de béton.

A partir de cette relation, on peut déduire, pour chaque rapport gravier sur sable (G/S), le volume minimal de pâte pour éviter le risque de blocage, en écrivant $R_b = 1$.

1.5.4 Méthode basé sur les plans d'expériences

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de compositions. [Khayat et al. \(1997\)](#) ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de liant, le rapport massique eau sur liant, la masse de superplastifiant et la masse de l'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction de différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple aux critères de l'[AFGC \(2000\)](#).

1.6 Propriétés des BAP à l'état durci

1.6.1 Résistance mécaniques

L'utilisation de filler calcaire permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges (mortier, béton). Ceci dépend fortement du dosage en filler. D'après plusieurs chercheurs La teneur optimale en filler pour avoir des résistances maximales est de 10%. Au de-là, l'effet du filler est marginale est entraîne une diminution des résistances. L'augmentation de la finesse du filler implique une augmentation de la résistance du mortier ([Pettersson2001](#)). D'après [De Larrard \(1999\)](#), l'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges.

La figure 1.16 (Gibbs et al. 1999) présente l'évolution de la résistance du BAP contenant des fillers comparée à celle du béton vibrés et soutiennent les affirmations précédentes.

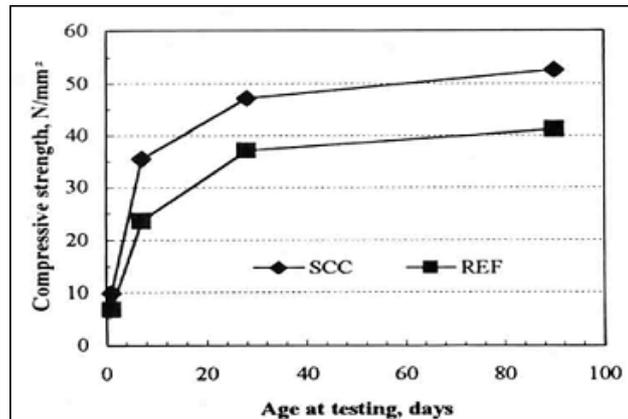


Figure 1.16: Évolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un béton vibré d'après (Gibbs et al. 1999)

L'effet positif du filler sur les résistances mécaniques s'explique par deux phénomènes : les fillers calcaire jouent un rôle physique, augmentent la compacité du mélange et d'autre part influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation (Ye et al. 2007). Bonavetti et al. (2001) ont montré que dans une pâte de ciment contenant du filler calcaire, les analyses DRX mettent en évidence trois phases :

- De 1 à 7 jours formation de carboaluminate hydraté, d'ettringite et diminution du CaCO_3 ;
- De 7 à 28 jours, transformation de l'ettringite en aluminate hydraté ;
- Après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté.

1.6.2 Module d'élasticité

Si on regardant à la formule générale du module ($E_{ij} = 11000 f_{CJ}^{1/3}$), celui-ci est fonction seulement de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. D'autres auteurs indiquent que les modules des BAPs sont plus faibles que ceux des bétons vibrés (Holschemacher 2010). Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).

1.7 Conclusion

L'intérêt et la faisabilité des BAPs ont donc été prouvés par de nombreuses expériences de chantier, dans des conditions et des domaines divers (bâtiment, ouvrage d'art). L'utilisation de tels bétons, présentant peu de ressuage et de ségrégation, devrait permettre d'obtenir des parements de bonne qualité pour les ouvrages. Toutefois, même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un ingénieur de fabriquer un tel béton, à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier des charges précis.

La formulation des BAPs est aujourd'hui essentiellement empirique et repose sur deux démarches: expérimentale et théorique, il ressort que la méthode Japonaise semble la plus facile à utiliser. Cependant, nous avons adopté cette méthode pour formuler notre BAP.

Chapitre 2:

EFFET DU CLIMAT CHAUD SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter un aperçu détaillé sur l'effet du climat chaud sur le comportement des bétons autoplaçant (BAP) à l'état frais, tel que les grandeurs rhéologiques, ainsi que la perte d'étalement pour simuler le transport du BAP par temps chaud, d'autre part, un intérêt tout particulier sera accordé dans ce chapitre aux travaux réalisés sur les effets néfastes des températures élevées sur les BAPs à l'état durcis ainsi que leur durabilité.

2.2 Climat chaud

Selon le comité 305 de l'American Concrete Institute ([ACI 305 2010](#)), le climat 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, [Berhane \(1992a\)](#) retient trois groupes de climats chauds, en se basant sur les humidités relatives (HR) moyennes des régions concernées :

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

L'hygrométrie de l'air est en effet un paramètre qui commande la capacité d'évaporation de l'eau à partir d'une surface plane fraîchement coulée de dalle ou de plancher. En précisant un peu plus, il est possible de distinguer deux catégories de climat où le temps chaud prévaut tout au long de l'année ([Mouret 1997](#)):

- Climats désertiques ou sahéliens, chauds et secs, rencontrés dans des régions de l'Afrique, de l'Amérique du Nord, du Sud de l'Australie et du Moyen-Orient. Ce type de climat est caractérisé par une température diurne de 40 à 50°C, une humidité relative faible et un rayonnement solaire intense (flux moyen de chaleur supérieur à 17 MJ/m²/jour). L'aridité est aggravée par la présence de vents dont l'intensité s'accroît généralement l'après-midi. L'écart de température entre le jour et la nuit est très prononcé (15 à 20°C en moyenne, jusqu'à 35°C). Les précipitations sont faibles et très espacées.
- Climats tropicaux ou équatoriaux, chauds et humides, rencontrés en Afrique, en Asie (au Vietnam par exemple) et en Amérique du Sud. Les régions concernées sont caractérisées par des températures de 30 à 40°C le jour, une humidité relative élevée

et des précipitations intenses (plus de 1500mm annuels). La variation de température entre le jour et la nuit ne dépasse pas 8 à 10°C.

Ces conditions sont plus sévères dans le bassin méditerranéen. En Algérie, le temps chaud se situerait plutôt dans la deuxième et troisième catégorie de la classification donnée par [Berhane \(1992a\)](#). Par exemple, à Chlef (zone côtière intérieure), les conditions de base durant l'été sont de 40°C à 50°C pour la température et de 50 à 65% pour l'humidité relative. Ce sont des périodes de l'année où les professionnels bétonniers ne disposent que de très peu de temps pour réagir.

Il est nécessaire de connaître l'effet de chaque facteur climatique cité ci-dessus. Cela nous permettra de mieux savoir leurs effets combinés.

2.3 Facteurs climatiques

2.3.1 Température

La température dans le Nord d'Algérie s'élève souvent à 50°C dans les régions côtières et intérieures et surtout les mois de Mai, Juin, Juillet et août étant les mois les plus chauds de l'année. La température maximale moyenne peut être aussi élevée que 45°C tandis que le minimum moyen varie de 15 à 20°C. Lorsque cette température ambiante élevée est combiné avec environ 12 Heures de soleil direct, il est compréhensible que la température en surface du béton et de coffrage peut être beaucoup plus élevée. En outre, une variation de la température ambiante jusqu'à 20°C peut se produire dans les 24 heures qui peuvent provoquer de graves contraintes thermiques dans le béton en particulier lorsqu'il est jeune.

2.3.2 Humidité relative (HR)

Le terme de l'humidité relative est défini comme le rapport de la vapeur d'eau disponible pour la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la saturation. Selon les lois de la nature, une augmentation de la température est toujours accompagnée d'une réduction de l'humidité relative. Plus l'humidité relative diminue, plus la capacité à absorber l'humidité de l'air dans les sources disponibles, y compris le béton. Par exemple l'humidité relative dans les régions intérieures de l'Algérie (Chlef) varie d'une moyenne maximum de 65-92 % pour atteindre une moyenne minimum de 30 à 40 % tout au long de l'année. La moyenne quotidienne de l'humidité relative est d'environ 72 % et 50 % respectivement en hiver et en été.

En outre, les régions intérieures de Chlef, Relizane et Ain Defla, ont beaucoup moins d'humidité relative où il s'élève à peine plus de 60 %. De plus, des variations considérables de l'humidité relative peuvent se produire en quelques heures seulement la création d'assez graves cycles d'humidification et de séchage. Lorsqu'il est combiné avec la salinité ambiante élevée qui est commune dans les zones côtières, ce qui pourrait entraîner le dépôt de sels à la surface du béton.

2.3.3 Rayonnement solaire et précipitations

Un rayonnement solaire élevé peut entraîner la chauffe des matières premières utilisées dans la production du béton, entraînant ainsi une température initiale élevée du mélange. Dans le ciel de la méditerranée et plus particulièrement la région intérieure (Chlef, Relizane et Ain Defla) est généralement toujours claire. La moyenne quotidienne de 12 heures d'ensoleillement en été est 7 à 8 en hiver.

Le rayonnement solaire et les précipitations influent sur la température et l'humidité relative. Dans l'absence de la pluie, 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. 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.

2.3.4 Le vent

Les effets de la persistance des vents forts sur les bétons frais et durcis ne doit pas être sous-estimée. Une augmentation de la vitesse du vent entraîne une augmentation du taux d'évaporation de l'eau. L'action du vent sur le béton frais est développée par Mamillan (1989): « en accélérant les échanges convectifs au niveau de la surface du béton, le vent accroît la quantité d'eau évaporée ». 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 15km/h (F.I.P 86). L'ACI 305 (1991) rapporte une augmentation de 300% de la vitesse d'évaporation si la vitesse du vent augmente de 8 à 32km/h, tout étant égal par ailleurs.

Les surfaces exposées de béton durci peuvent également être attaquées par des sels déposés par le vent. ils peuvent également être déposés sur les agrégats et sable résultant en une forte

teneur en sel dans le béton, à moins que des précautions sont prises. Des vitesses de vent d'entre 6,0 et 12 km/h ont été observées pour plus de 75 % du temps en fonction de résultats obtenus de l'agence climatologique de la ville de Chlef. La vitesse du vent moyenne quotidienne de cette région et d'environ 11 km/h toute l'année.

2.3.5 Evaporation

D'après des études antérieures l'évaporation (Figure 2.1) est le paramètre préoccupant lors du bétonnage par temps chaud et qu'elle est accrue sous l'action combinée des facteurs décrits précédemment. Elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé (Berhane 1992b). Dans le cas du béton frais, la surface d'eau est créée par le phénomène de ressuage.

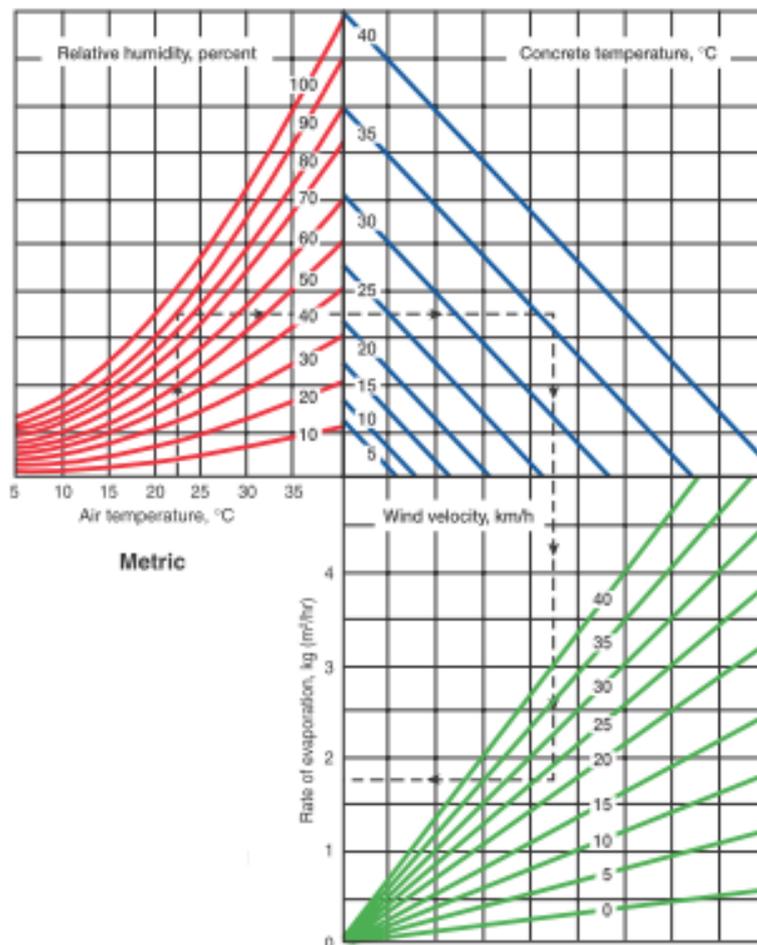


Figure 2.1: ACI Abacus permettant d'évaluer le taux d'évaporation à la surface d'un béton.

2.4 Changement climatiques de la région méditerranéenne

Gao et Giorgi (2008) ont étudié le changement de régimes climatiques arides sur la région méditerranéenne qu'implique le changement climatique des projections de Gao et al. (2006),

qui ont été effectuées à l'aide d'un modèle climatique régional à haute résolution. Il peut être mentionné que ces auteurs ([Gao et Giorgi 2008](#)) ont trouvé réchauffement maximum au cours de l'été sur la plus grande partie de la région méditerranéenne. [Somot et al. \(2008\)](#) ont également étudié la réponse au changement climatique en Europe et dans le bassin méditerranéen à l'aide d'une haute résolution couplé océan-atmosphère, modèle climatique régional (AORCM). Ce Modèle a été conçu pour représenter les principales caractéristiques atmosphériques et océaniques du bassin méditerranéen, ils ont obtenu que le changement climatique simulé par l'AORCM montre un réchauffement important à la fin du 21e siècle pour toutes les saisons avec des valeurs maximales (supérieures à 6 °C) dans la partie orientale de l'Europe en hiver et dans la partie sud de l'Europe en été. Cette simulation montre qu'il ya un séchage dans la zone de l'Europe et le bassin méditerranéen à l'exception de l'Europe du nord où le climat devient surtout plus humide. Sur le sud de l'Europe, la diminution des précipitations entre la période 1961- 1990 et 2070-2099 la période souvent atteint -30 % en été ([Somot et al. 2008](#)).

Les deux études ont examiné les changements climatiques dans le mode de température augmente et les précipitations diminuent parmi d'autres variables et des index ([Gao et Giorgi 2008](#); [Somot et al. 2008](#)). Par conséquent, on peut dire que la température s'élève devrait être supérieure à 30 °C degrés en été pour une période de cent ans à la région méditerranéenne et les valeurs des variables concernant l'humidité relative, comme les précipitations, la vapeur d'eau, de l'évapotranspiration potentielle, et du rayonnement net semblent augmenter. Ces conditions peuvent être dites que les conditions climatiques chaudes qui seront mentionnées dans le paragraphe suivant. De telles conditions rendent difficile afin d'obtenir de bonnes propriétés frais et durci.

[ACI 305R-10](#) explique le temps chaud, les conditions météorologiques chaudes, ses effets négatifs sur les propriétés du béton frais et durci, les essais et les précautions requises (choix des matériaux, conception, coulée et durcissement des applications, etc.) ([ACI 2010](#)). On peut dire que la mise en place, la finition et le durcissement du béton nécessitent des soins supplémentaires par temps chaud. Lorsque les températures augmentent au-dessus de 27 ° C, le réglage rapide, les résistances plus faibles et les fissures sont tous plus susceptibles. Cependant, ces problèmes peuvent être évités en reconnaissant les causes et en minimisant les effets de chaleur ([ACI 2010](#)).

Selon les projections du changement climatique ci-dessus, il semble que la température atteindra plus de 30 °C en été pour les cent prochaines années dans la région méditerranéenne.

De cette façon, on peut dire que le bétonnage par temps chaud ou les types de béton résistants aux conditions météorologiques chaudes peuvent être considérés comme importants pour la région Méditerranéenne (Algérie, Sud de la France ou Sud de la Turquie, etc.).

Les paramètres climatiques à prendre en compte dans une situation de temps chaud sont nombreux. En ajoutant leurs interactions, il est très difficile d'être en mesure de les étudier simultanément dans leur ensemble.

2.5 Effet de la température sur les propriétés du BAP

2.5.1 A l'Etat frais

D'après [Al-Martini \(2016\)](#), les effets de la température ambiante et le temps de malaxage sur la perte d'étalement du béton autoplaçant (BAP) sont critiques pour le bétonnage par temps chaud. Des mélanges de béton de ciment Portland ordinaire, ont été faits avec un rapport eau/ciment de 0,38 et l'intégration d'un polycarboxylate, sulfonate de mélamine ou un superplastifiant à base de sulfonate naphthalène. Les mélanges de béton ont été continuellement agités jusqu'à 110 min en utilisant un mélangeur à faible taux de cisaillement sous des températures allant de 22 à 45 °C. Les résultats montrent que le béton peut subir une perte d'étalement important lorsque le malaxage est prolongé à haute température. Connaissance de l'effet du superplastifiant à température élevée et prolongée le temps de mélange est essentiel pour assurer une croissance adéquate des propriétés rhéologiques du béton par temps chaud ([Figure 2.2](#)).

Les effets d'un tel système de mélange prolongé sous différentes températures sur la perte d'étalement et de résistance du béton à l'âge de 12 h, 1, 3, 7 et 28 jours ont été étudiés. Les résultats montrent que le béton peut subir une perte d'étalement important lorsque le malaxage est prolongé à haute température. Les résultats indiquent également que la résistance en compression du béton dépend de la température, le temps de mélange et de type de superplastifiants. Au jeune âge la résistance en compression du béton muris à haute température peut être environ quatre fois supérieur à celle muris à température modérée. En revanche, la réduction de la résistance à long terme du béton soumis à haute température peut dépasser 10 % ([Al-Martini 2016](#)).

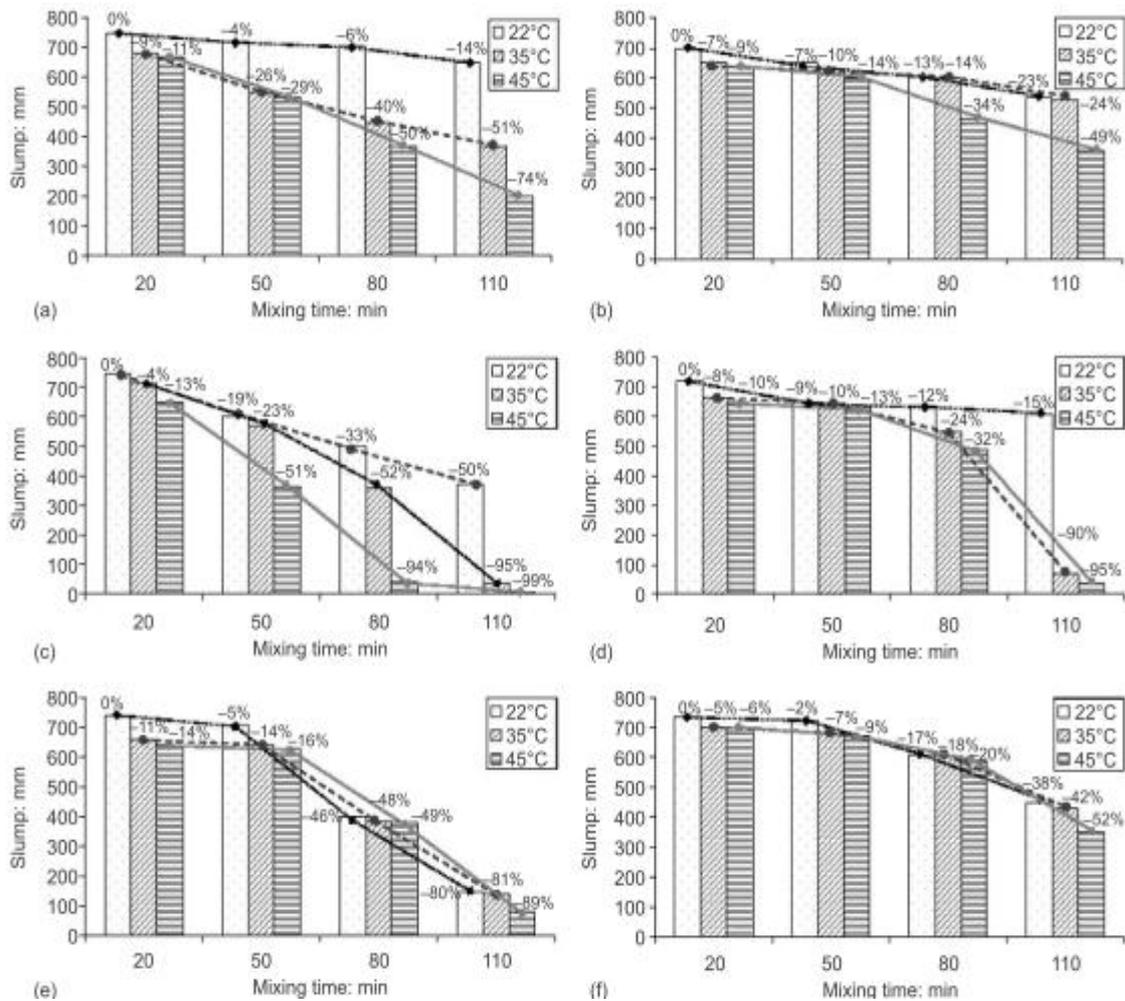


Figure 2.2: Effet de différents superplastifiants sur la perte d'étalement du BAP soumis à diverses températures et temps de mélange : PC (a-0.8% et b-1.0%), ML(c-2.4% et d-2.8%) et NS(e-1.6% et f-1.8%) (Al-Martini 2016).

Selon Abduljabbar (2008), 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'autoplaçance avec l'élévation de la température du mélange (Figure 2.3). 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 (Figure 2.3).

Ghafoori et al. (2010) 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. 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.

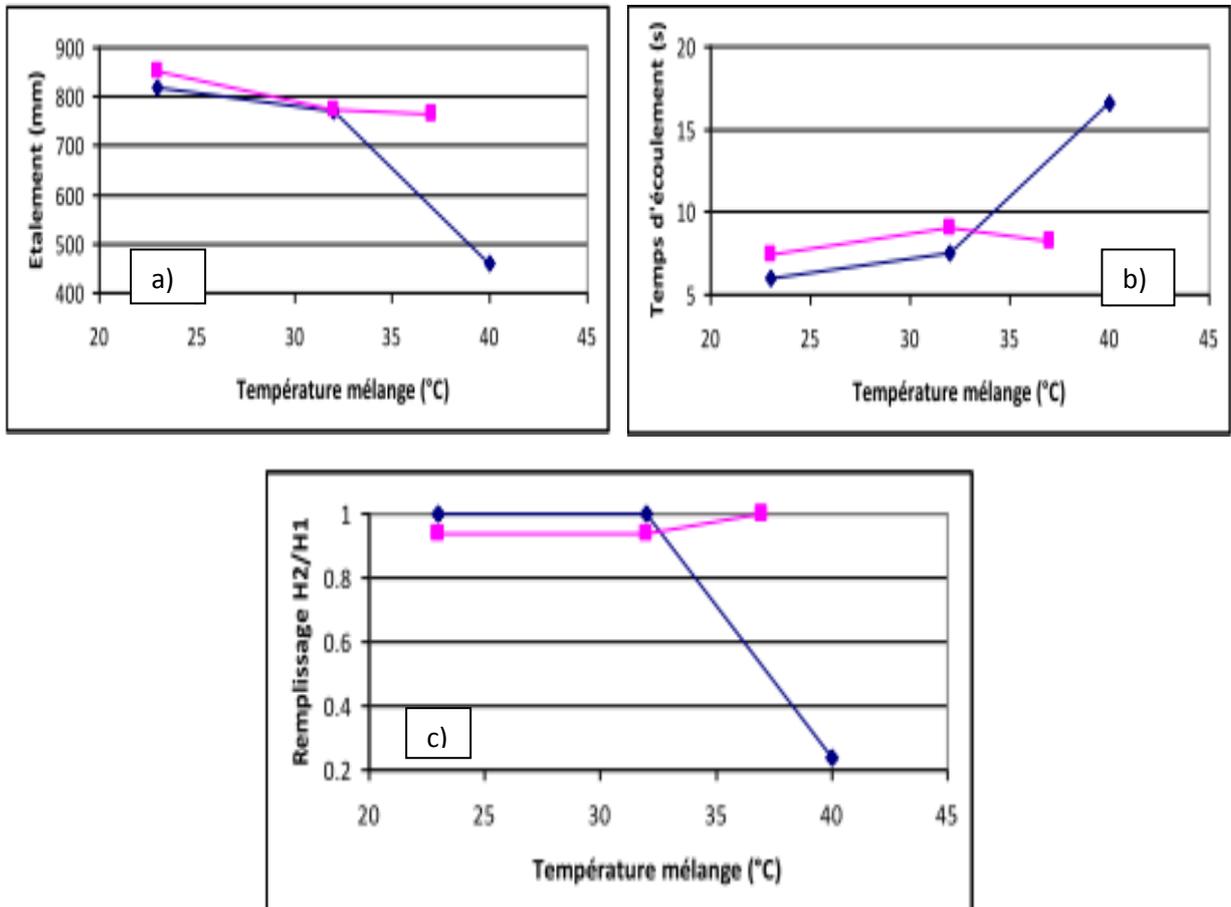


Figure 2.3: Effet de la température du BAP sur l'ouvrabilité initiale :(a) l'étalement, (b) temps d'écoulement à l'entonnoir en V (b) et (c) pourcentage de remplissage à la boîte en L (Abdeljabbar 2008).

Tableau 2.1: Composition des mélanges (Adeljabbar 2008).

	Mélange A (Bleu)	Mélange B (Rose)
OPC (kg/m ³)	408	533
Cendre volante	50	70
G/S	0.55	1.05
SP/fines (%)	0.8	0.8
Eau	177	176

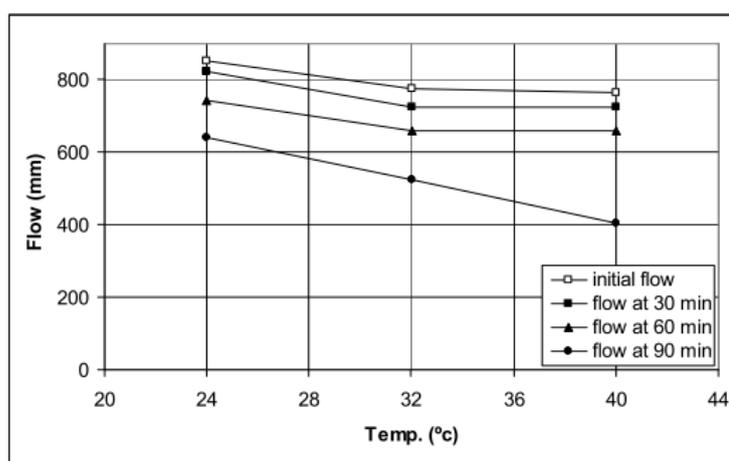
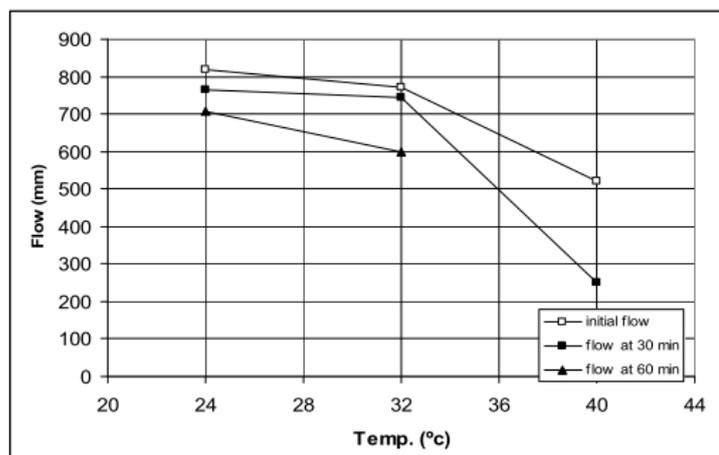


Figure 2.4: Effet de la température du BAP sur l'étalement à 0, 30, 60 et 90 minutes après le malaxage (Mélange A à gauche, Mélange B à droite) (Adeljabbar 2008).

D'autre chercheur (Weisheit et al. 2010) ont utilisé un BAP à la base d'un ciment au laitier CEMIII-A, un rapport E/C =0.45, un superplastifiant de type ester polycarboxylique, et dont le rapport G/S<1, montrent que pour maintenir l'étalement constant entre les températures et l'humidité relative (5°C, 90%HR), (10°C,90%), (15°C, 75%), (20°C, 60%), (25°C, 45%), (30°C, 30%HR), il faut diminué la quantité de superplastifiant avec l'augmentation de la température (Figure 2.5), les auteurs n'explique pas ce résultat.

Tableau 2.2: Données climatique (Weisheit et al.2010).

Point climatique	K5	K10	K15	K20	K25	K30
Température (°C)	5	10	15	20	25	30
Humidité (%)	90	90	75	60	45	30

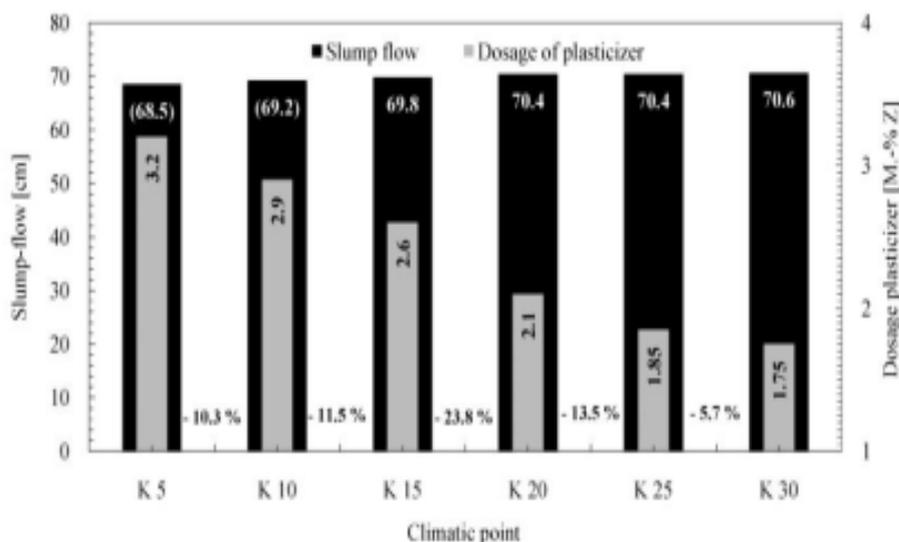


Figure 2.5: Variation du dosage du superplastifiant à différents points climatiques (Weisheit et al.2010).

Si les températures augmentent, la réactivité du ciment augmente. En conséquence, l'augmentation du temps d'entonnoir à des températures plus élevées. À des températures plus basses, l'efficacité du superplastifiant est de nouveau sensiblement retardée. Une des raisons de ce retard pourraient être les différents taux d'adsorption du superplastifiant à différentes températures. Ainsi, le ralentissement diminue. Ainsi, la viscosité et, par conséquent, le temps d'entonnoir sera également influencé et leurs valeurs augmenteront. Les viscosités relatives montrent une tendance similaire à celle du temps d'entonnoir. Une exception apparaît au point climatique K5. Ici, la liquéfaction retardée à basse température peut être observée, car cette mesure a eu lieu vers 4 minutes plus tard que la mesure du temps d'entonnoir. Ce court délai a été assez long pour voir apparaître cet effet prononcé.

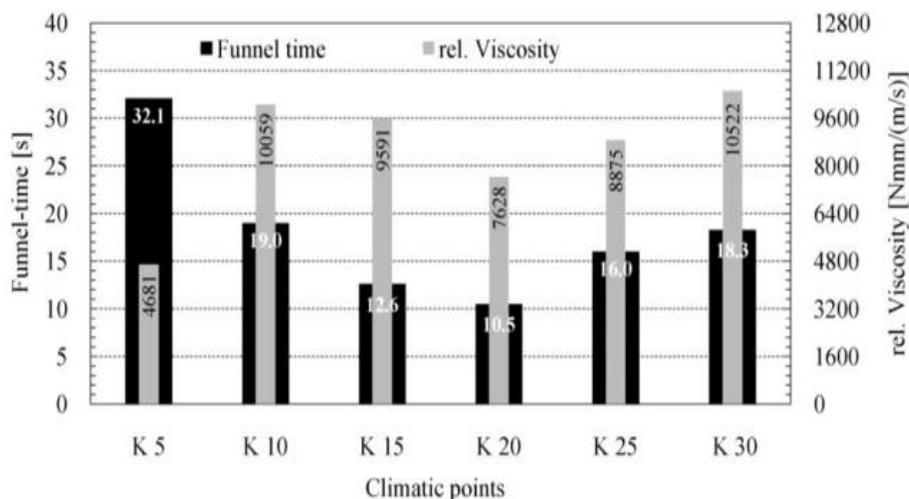


Figure 2.6: Temps V- Funnel, viscosité relative à différents température (Weisheit et al. 2010).

Selon Vinh (2014), l'élévation de la température initiale du mélange de 20°C à 50°C et ses conséquences sur le maintien de l'autoplaçance n'induit pas des variations significatives des teneurs en air et de l'eau réellement contenue dans les bétons incorporant le ciment CEMI. En revanche, la même élévation de température provoque une diminution de l'eau réellement contenue et une augmentation de la teneur en air dans le béton incorporant le ciment CEM III. La fixation moins importante de l'eau de gâchage favorise l'évaporation dans le cas de BAP incorporant un liant ternaire (clinker+laitier+filler calcaire) contenant moins de clinker. Néanmoins, le maintien de l'autoplaçance dans le cas de BAP(liant ternaire) est dû à la présence du superplastifiant. Ce dernier limite même les ajouts d'eau dans le cas des BAPs incorporant un liant binaire (clinker+filler calcaire). Les effets d'une température élevée au malaxage sur le maintien de l'autoplaçance et les conséquences sur la formulation sont moins marqués que ceux relevés dans le cadre des bétons traditionnels vibrés.

2.5.2 Etat durci

L'influence des conditions météorologiques chaudes sur les propriétés du béton frais peut également être reflétée dans les propriétés de béton durci comme la résistance à la compression et le module d'élasticité et ainsi sur la durabilité.

2.5.2.1 la résistance à la compression

Bien que la résistance à la compression puisse donner peu d'indication quant à la durabilité du béton, il s'agit d'un test utilisé dans le monde entier comme moyen de conformité et de contrôle de la qualité. Dans cette revue, on mentionnera seulement les effets des conditions météorologiques chaudes sur la résistance à la compression du béton.

Vinh (2014) a étudié l'effet du climat chaud sur l'évolution des résistances, mesurées sur éprouvettes de contrôle, des BAPs mis en œuvre à 50°C et pour lesquels l'autoplaçance a pu être maintenue, soit par un ajout d'eau, soit par un surdosage en superplastifiant. Ces évolutions sont comparées à celle des BAPs de référence dont la température initiale est de 20°C. Dans le cas des bétons BAP1 et BAP2 incorporant le ciment CEM I, l'élévation de la température de confection de 20°C à 50°C tend à induire une augmentation des résistances à 1 jour, 7 jours et 28 jours, quels que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance (Figures 2.7a et 2.7b). Seule la résistance à 1 jour de BAP2 50SP-20 est équivalente à la référence. Ce retard de résistance par rapport à BAP2 50E-20 est dû vraisemblablement au surdosage en superplastifiant qui conduit à une plus faible maturité d'après le suivi des températures ; l'effet retard du superplastifiant est d'ailleurs très marqué par comparaison à BAP1.

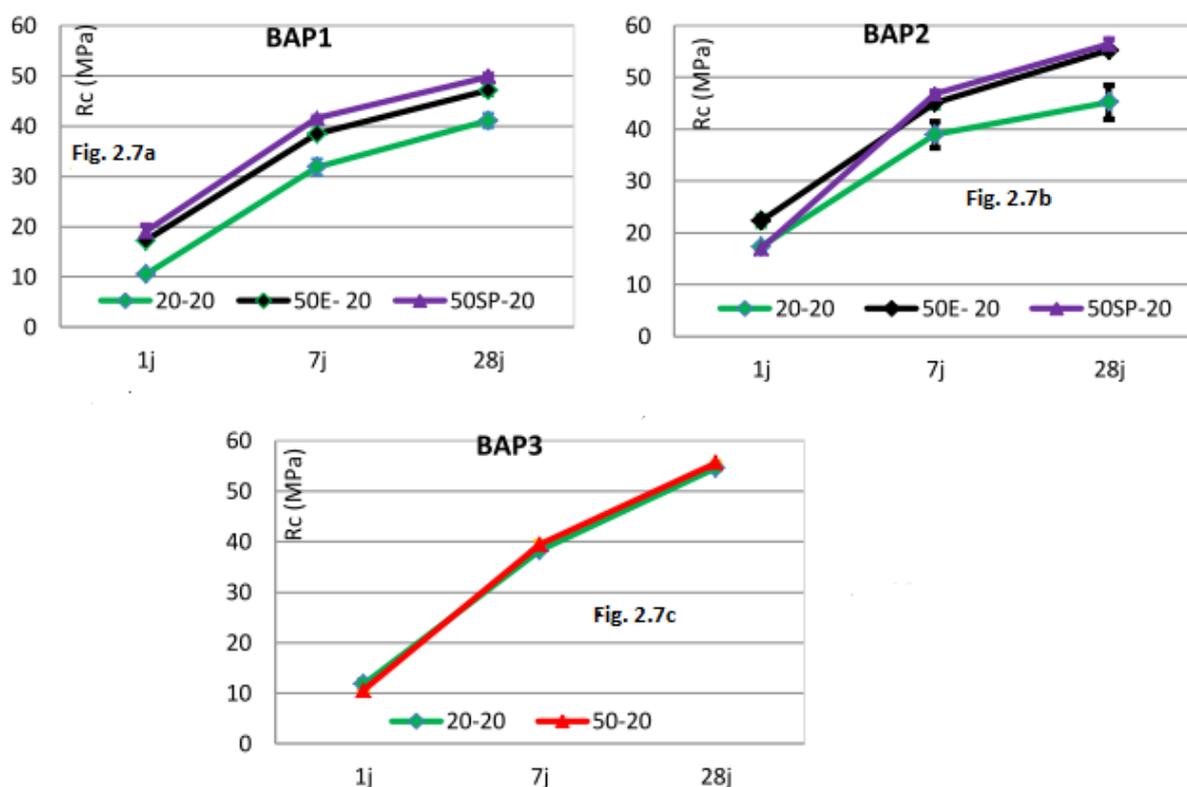


Figure 2.7: Evolution des résistances à la compression en fonction des moyens de maintenir (Vinh2014).

Pour le béton BAP3, les résistances sont totalement similaires à 1 jour, 7 jours et 28 jours lorsque la température au malaxage augmente de 20°C à 50°C (Figure 2.7c). Les variations de maturité au jeune âge, mais également des variations avérées des teneurs en air occlus et en eau réellement contenue sont à l'origine de ce résultat (Vinh 2014).

Il y a un accord entre les chercheurs qu'une augmentation de la température de séchage entraîne une augmentation de la résistance en compression du béton à jeune âge. La Figure 2.8 montre l'effet de la température de séchage d'une journée sur la résistance en compression des bétons (ACI 1982). Comme la température a augmenté, il y a eu pour conséquence une augmentation de la résistance en compression. Il a également été montré par Skansk (1981) que le taux d'augmentation de la résistance est significatif par des températures plus élevées au jeune âge, cette tendance est aussi confirmée par Abdulla (1988).

Cependant, il existe un désaccord sur les effets de la température ambiante sur les résistances à 28 jours Abdulla (1988). Ce désaccord peut être attribué, entre autres facteurs, au fait que la composition du ciment utilisée par les différents chercheurs auraient pu être différente, aboutissant ainsi à un comportement de développement de résistance totalement différent. Il

est également important de mentionner que, à l'exception des éprouvettes hermétiquement fermées et durcies à l'eau, de petits échantillons ont été utilisés et l'évaporation a eu lieu de tous les côtés, une technique qui ne représente pas les conditions réelles de coulage.

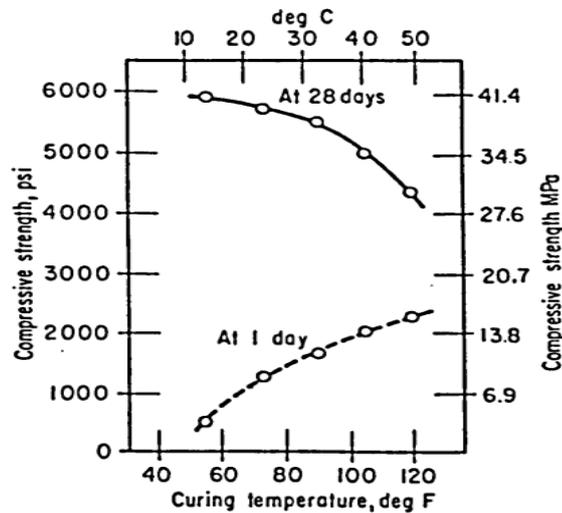


Figure 2.8: Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température de séchage (ACI 1982).

En ce qui concerne l'humidité relative (HR), il y a un accord entre les chercheurs qu'un manque d'humidité entraînera une résistance médiocre. La Figure 2.9 montre l'effet de l'humidité relative sur les résistances en compression à 28 jours d'un mélange de ciment Portland.

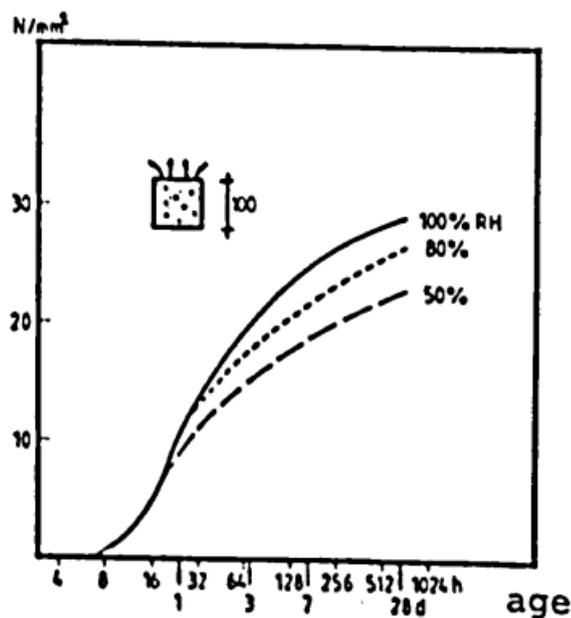


Figure 2.9: La résistance à la compression en fonction de l'humidité relative (Skansk 1981).

La différence de la résistance en compression entre les éprouvettes conservées dans les environnements de 100% et 50% d'humidité relative augmente avec le temps. Il est pertinent de mentionner ici que la taille des éprouvettes peuvent jouer un rôle important dans le développement de la résistance à la compression des éprouvettes exposées à un environnement sec (Wainwright 1986).

2.5.2.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un béton ordinaire.

D'après différents codes (Eurocode, ACI 318), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP à base de différentes additions minérales devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, Assié (2004) a trouvé que, pour trois classes de résistance (20, 40, 60MPa), le module de déformation est équivalent entre BAP et béton ordinaire.

Persson (2001) qui a étudié des BAPs à base de filler calcaire et d'autres BAPs à base d'une addition binaire (filler calcaire + fumée de silice) a montré que le module d'élasticité des BAPs (compte tenu de l'addition minérale utilisé) est similaire à celui des bétons vibré (Figure 2. 10).

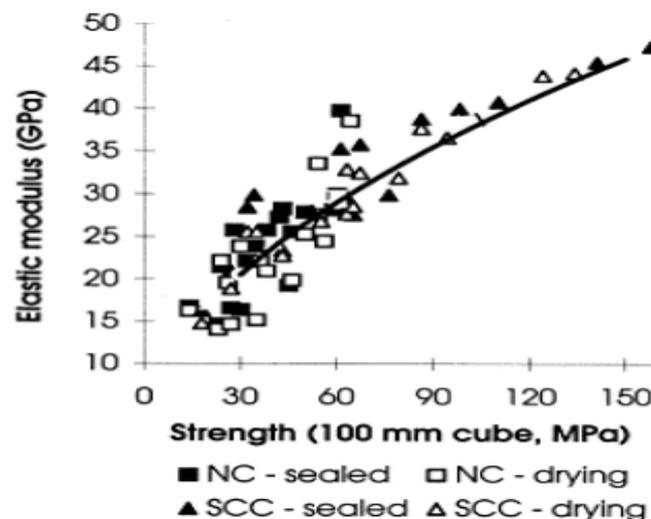


Figure 2.10: Module d'élasticité en fonction de la résistance à compression (Persson 2001).

Domone (2006) a montré que l'influence du type d'additions minérales sur les modules d'élasticité des BAPs est secondaire, puisque tous les BAPs confectionnés avec les différentes additions minérales présentent des modules équivalents à ceux des BV (Figure 2.11).

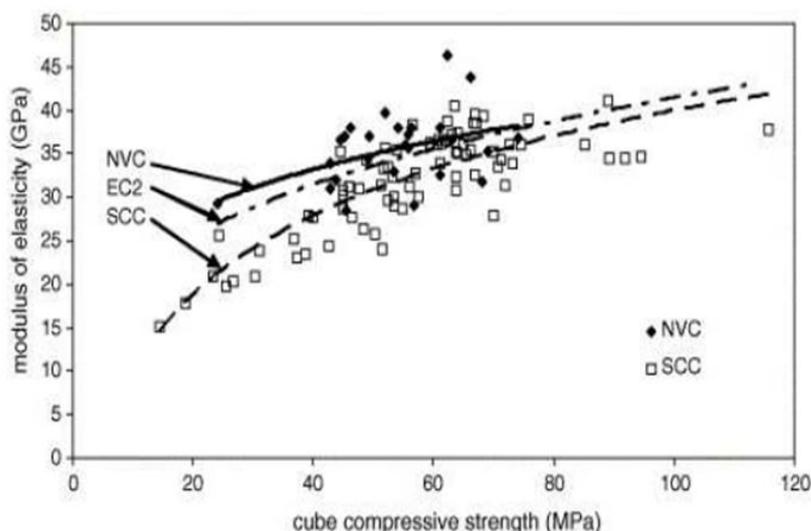


Figure 2.11: Module d'élasticité en fonction de la résistance à compression (Domone 2006).

A partir d'une analyse des données tirées de la littérature Domone (2007) a constaté que les BAPs présente une rigidité inférieure à celle du béton vibré, en particulier à des valeurs de résistance à la compression plus faibles.

D'après Vinh (2014), Pour un mode de conservation donné, il ne se dégage pas d'écart significatif lorsque la température initiale augmente, quels que soient les moyens éventuels de maintenir l'autoplaçance. De même, le mode de conservation des éprouvettes durant les premières 24 heures n'induit pas de différences significatives sur les modules d'élasticité. On retiendra simplement que les valeurs oscillent sans grande variation autour de 30 GPa.

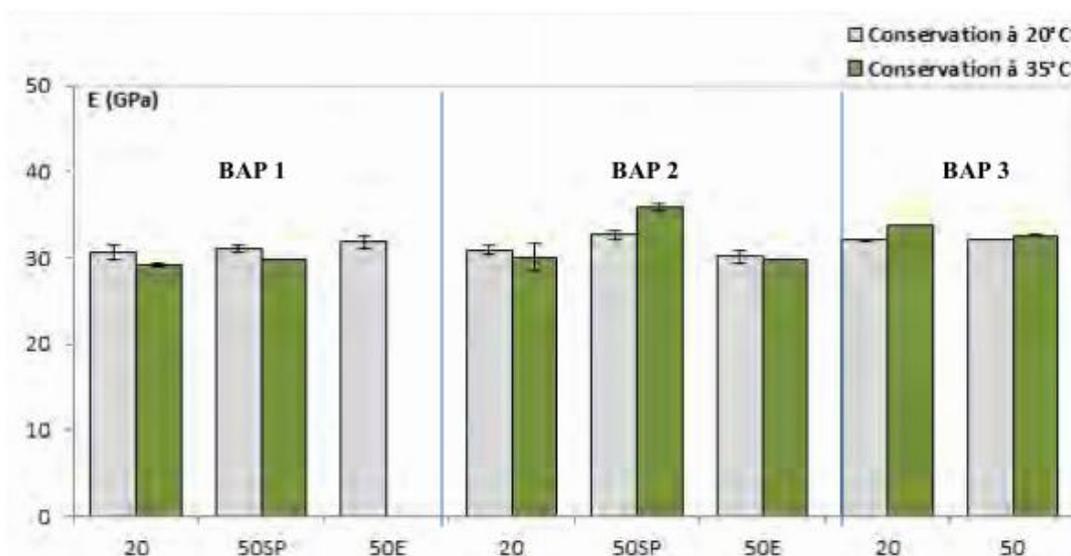


Figure 2.12: Evolution des modules d'élasticité en fonction de la température initiale du béton, des moyens pour maintenir l'ouvrabilité lorsque la température initiale est de 50°C et du mode de conservation (Vinh 2014).

2.6 Propriétés de transport et durabilité

On rapporte dans ce paragraphe les effets d'une température élevée à long terme sur le réseau poreux des BAP. En particulier, on s'intéressera aux études des indicateurs de durabilité:

- la porosité qui traduit le volume poreux du matériau;
- La Sorptivité (l'absorption capillaire) qui donne une image de la taille des pores
- L'absorption d'eau.

2.6.1 Porosité totale

Le béton est un matériau poreux. Cette porosité est complexe puisqu'elle s'étale sur différentes échelles et résulte de différents phénomènes. Mais le caractère poreux du béton est très important puisque la résistance de celui-ci est liée à sa porosité comme le montre la [Figure 2.13](#).

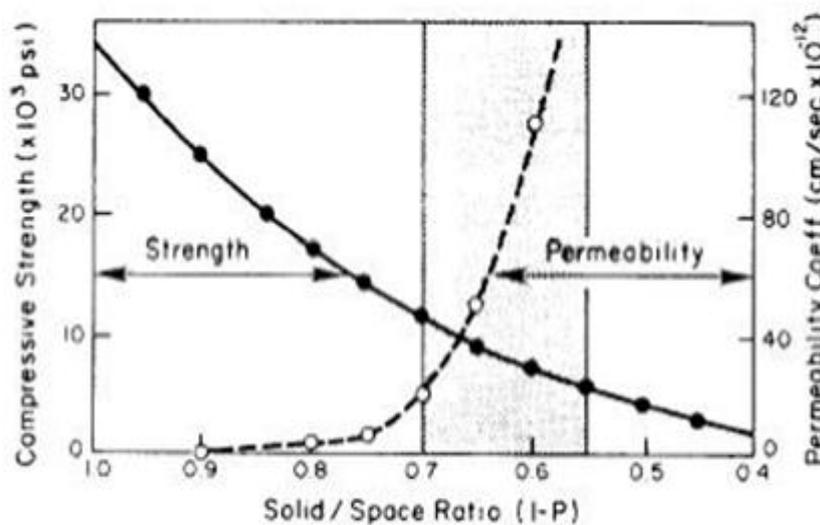


Figure 2.13: Relation entre résistance, perméabilité et porosité du béton (Metha 1986).

De manière générale, on voit que plus le béton est poreux, plus sa perméabilité est grande et plus sa résistance à la compression diminue.

Les pores du béton s'étendent sur une échelle allant du nanomètre au millimètre, ce qui fait un facteur d'un million entre les pores les plus petits et les plus gros. On peut distinguer 4 grandes familles de pores.

- porosité des feuilletts de CSH à l'échelle du nanomètre ;
- porosité capillaire comprise entre quelques dizaines de nanomètres à quelques micromètres ;

- l'air entraîné (décrit plus en détail dans un paragraphe ultérieur) entre 50 micromètres et 1 millimètre. Cette porosité est essentiellement associée à l'utilisation d'agent entraîneur d'air ;
- l'air occlus à l'échelle macroscopique. Cette porosité provient de l'air piégé lors du malaxage du béton. Elle peut être minimisée par une vibration appropriée qui augmente la compacité. On peut la mesurer à l'aide d'un essai à l'aéromètre, mais pour un béton courant, les valeurs sont de 2 à 3 % du volume total de béton.

D'après (Gagne et Aitcin 1993) l'hydratation du ciment n'est jamais totale. En effet, l'hydratation des gros grains conduit à la formation d'une couche d'hydrate très dense sur le pourtour, empêchant ainsi l'intérieur du grain de s'hydrater. C'est pour cela qu'il subsiste toujours de la porosité capillaire, même si le rapport E/C a été réduit au cas idéal. Il est également intéressant de remarquer que la diminution du rapport E/C diminue la taille des pores capillaires mais aussi leur nombre comme la montre la Figure 2.14.

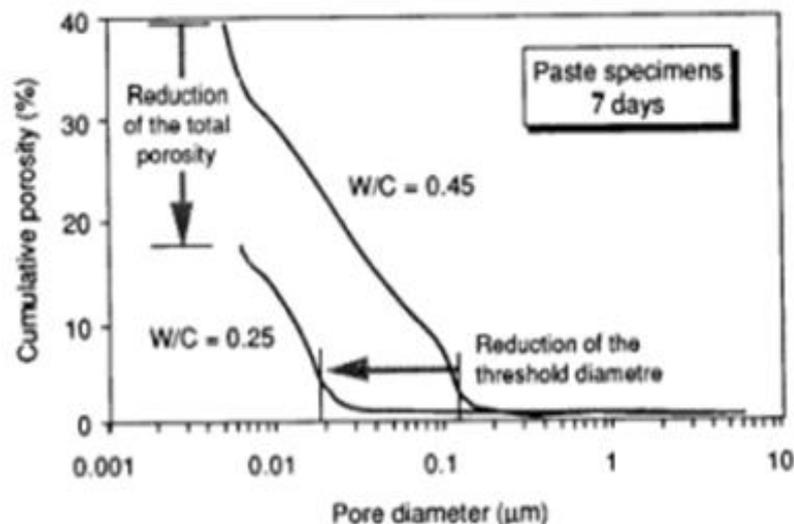


Figure 2.14: Prosimètre au mercure de deux pâtes de ciment conservées dans l'eau pendant 7 jours (Gagne et Aitcin 1993).

Mouret et al.(2005) ont montré que la conservation des éprouvettes de contrôle à 35°C durant 5 heures n'induit pas une augmentation de la porosité accessible à l'eau à 28 jours, pour une température initiale donnée, un moyen donné de maintenir la consistance lorsque la température initiale durant le malaxage était à 50°C, quelles que soient la classe de résistance étudiée (22MPa ou 35MPa) et la nature des granulats (siliceux ou calcaire poreux).

Reinhardt et Stegmaier (2006) ont étudié l'influence de la température sur la porosité (mesurée par intrusion au mercure) de BAP à maturité équivalente à 3 jours de cure isotherme à 20°C. Ils ont constaté que l'élévation de la température ne modifie pas significativement la

porosité totale (Figure 2.15) mais qu'elle agit sur la répartition des pores en augmentant la quantité des petites tailles de pores capillaires (au voisinage de $0,1\mu\text{m}$). D'après Reinhardt et Stegmaier (2006) l'hydratation accélérée par la température diminue la porosité dans les premiers âges du béton.

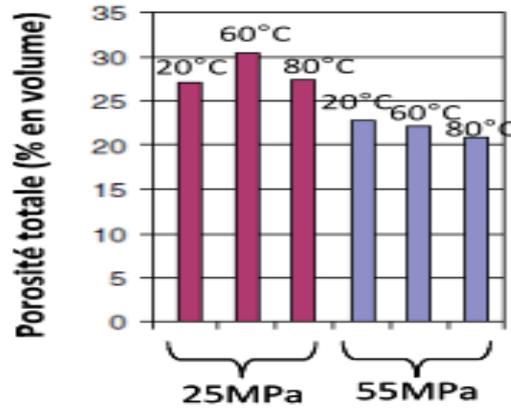


Figure 2.15 : Porosité totale de BAP conservés à 20°C, 60°C et 80°C (Reinhardt et Stegmaier 2006).

2.6.2 Influence du mode de cure sur la porosité totale

Le processus d'hydratation des ciments est un phénomène complexe pour lequel les conditions environnementales constituent des paramètres importants. L'ensemble des réactions précipitations-cristallisations mise en jeu lors du durcissement de ces matériaux engendre la formation de leur porosité. C'est pourquoi ces facteurs environnementaux, c'est-à-dire les conditions de cure (température et humidité relative) des matériaux cimentaires, sont nécessairement à prendre en compte lors de l'étude de leur porosité et des propriétés qui y sont liées.

Nicolas (2012) a étudié l'effet du mode cure sur la porosité, parmi les résultats trouvés, la cure froide n'a induit aucune modification significative de la porosité totale accessible à l'eau quel que soit la composition en ciment. La cure sèche induit, par rapport à la cure normalisée, une variation moyenne de la porosité de +3% pour les échantillons de mortiers (Figure 2. 16).

En outre, (Buikni et al. 2009, Bur et al. 2010a) ont étudiés l'influence de la proportion du laitier sur la porosité. Après la cure froide et en comparaison à l'échantillon de référence, la substitution du clinker par du laitier de haut fourneau à hauteur de 45% ne modifier pas la porosité totale accessible. Une substitution de 60% implique une augmentation de négligeable de 4% et une substitution de 80% augmente la porosité de 15%. Après une cure sèche, la porosité des échantillons des mortiers augmente de façon linéaire avec la proportion du laitier (Figure 2.17).

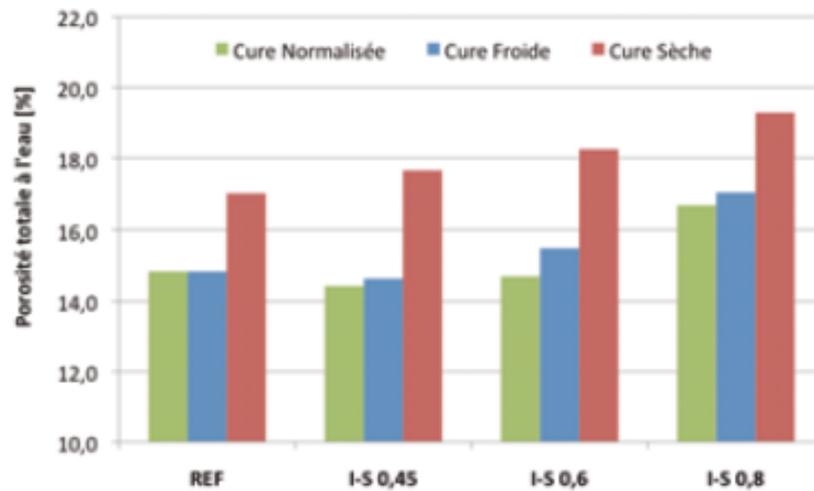


Figure 2.16: Porosité à l'eau selon la cure pour tous les teneurs de laitier (Nicolas 2012).

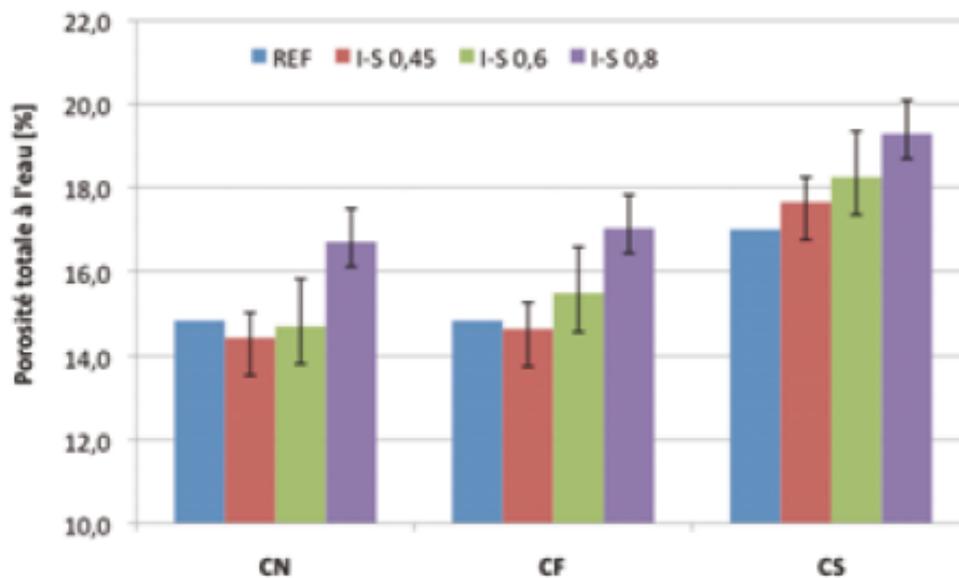


Figure 2.17: Porosité à l'eau des échantillons en fonction de la cure et de la teneur de laitier (Bur et al. 2010a).

Les résultats présentés par Vinh (2014) montrent que pour les bétons incorporant du filler calcaire (BAP1 et BAP2) le bétonnage par temps chaud semble modifier de manière légère la porosité Figure 2.18. Comparativement aux matériaux confectionnés à 20°C et conservés à 20°C, on observe qu'un ajout d'eau permettant de maintenir les propriétés rhéologiques n'augmente pas significativement cette grandeur. Dans ce cas, l'augmentation de la quantité d'eau d'apport qui a été compensée par l'évaporation générée lors de la hausse de température des constituants n'a pas d'incidence sur le volume poreux. D'autre part, avec un surdosage en superplastifiant, les bétons fillérisés gâchés à température élevée présentent une diminution de la porosité. Ce résultat peut s'expliquer par un double effet généré par la défloculation des

grains de ciment et par une diminution du rapport E/C due à l'évaporation de l'eau lors du gâchage. Pour les matériaux confectionnés avec la matrice ternaire (BAP3). Pour une phase liante à base de laitier, une hausse des températures de confection et de maturation ne semblent pas affecter significativement cet indicateur de durabilité.

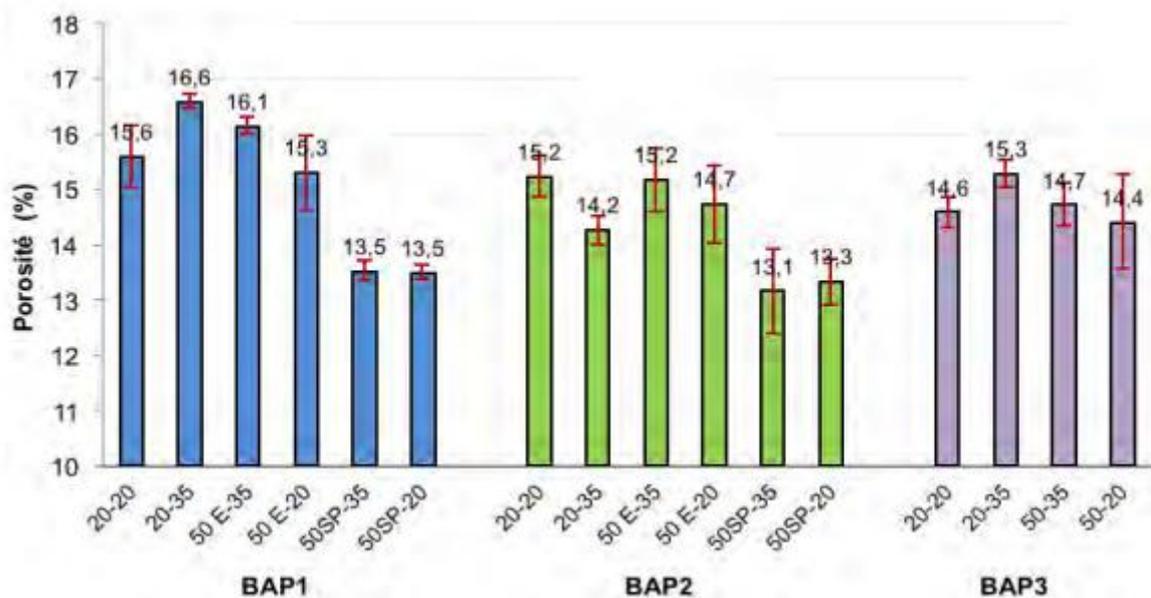


Figure 2.18: Valeurs de la porosité accessible à l'eau (moyenne et dispersion) obtenues pour les différents BAPs (Vinh 2014).

2.6.3 Absorption capillaire

Il est nécessaire pour les structures en béton armé d'entreprendre une maintenance pour prolonger sa durée de vie. Cependant, la fréquence des travaux de maintenance peut être minimisée en utilisant un matériau durable. Dans les structures en béton armé, la corrosion entraîne par la suite une détérioration de la capacité structurelle, de la maintenance et même de l'apparence de la structure. Il est évident que l'air et l'eau jouent un rôle important dans le déclenchement du processus de corrosion. Si l'entrée de ces deux composants peut être empêchée, l'apparition de la corrosion serait évitée. Une des méthodes pour mesurer l'entrée d'eau dans le béton est effectuée par le test de Sorptivité. Ce test est utilisé pour déterminer les propriétés du béton proche de la surface qui peut contrôler le transport de l'eau dans le béton et le renforcement. L'absorption d'eau ou la Sorptivité du béton peut être considérée comme une mesure des forces capillaires exercée par les pores des structures qui entraîne la formation des liquides dans le béton (Hall 1989).

Cependant, il a été rapporté que la Sorptivité du béton était affectée par son état de surface. En outre, la teneur initiale en humidité du béton a également altéré l'absorption supplémentaire de l'eau (Martys1997).

Au cours de la dernière décennie, le béton autoplaçant (BAP) a été considéré comme un matériau de construction prometteur. Ceci est attribué au fait que le BAP peut être placé et compacté sous son propre poids sans aucune vibration soit extrêmement importante, en particulier dans les zones fortement encombrées.

Khatib (2008) a étudié la Sorptivité des BAPs contenant des cendres volantes avec un taux de remplacement varié de 0 à 80%, un rapport eau/liant de 0,36. Les résultats trouvés (Figure 2.19) montrent une augmentation systématique de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes.

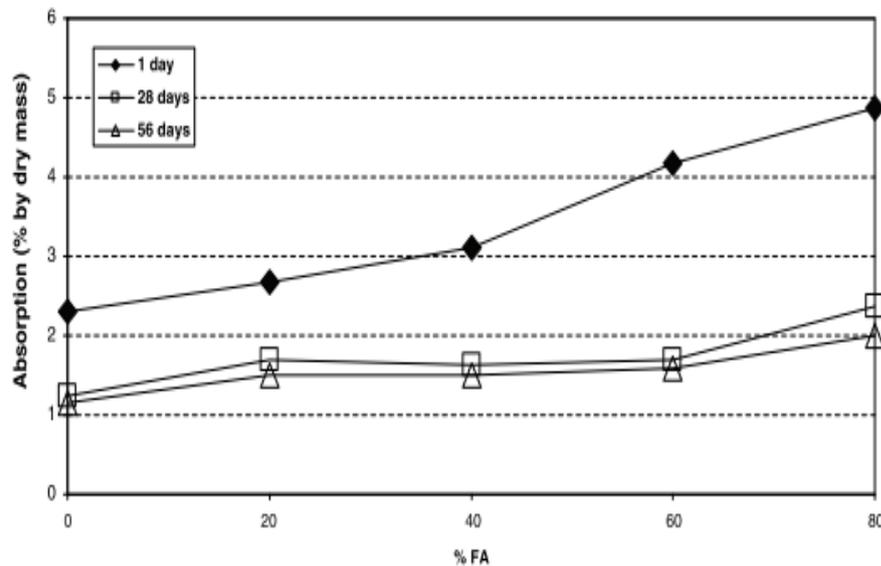


Figure 2.19: Influence de la teneur du Cendre Volante (CV) sur la Sorptivité (SP=0.7%) (Khatib2008)

Kanellopoulos et al. (2012) ont également observé des variations similaires entre la résistance à la compression et la Sorptivité.

D'après Leng et al. (2016) le remplacement partiel de ciment Portland (CPA) par des cendres volantes (CV) et la fumée de silice (FS) dans les BAPs réduit la Sorptivité, En outre, lorsque le remplacement du CPA par les CV seul la réduction du Sorptivité est sensible lorsque la quantité de (CV) est supérieure à 20%. Par contre, l'utilisation des deux ajouts à la fois CV+FS réduit considérablement la Sorptivité. Cela indique que l'effet bénéfique de la combinaison des ajouts cimentaires.

2.6.4 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est généralement mesurée en séchant l'échantillon à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation en masse en pourcentage de la masse sèche. Diverses procédures peuvent être utilisées comme l'immersion dans l'eau pendant 24 h (ASTM C 796 2002), et la méthode de saturation sous vide (ASTM C 1202, 2002).

Javier et al. (2011) ont étudiés l'effet de l'humidité relative sur l'absorption d'eau des mélanges de mortiers. Ils ont montré que l'eau absorbée pendant 90 jours par les mortiers conditionnés à différentes humidités relatives (Figure 2.21). On remarque que l'absorption d'eau est très sensible à l'humidité relative à laquelle les échantillons ont été pré-conditionnés avant l'essai. Dans chaque cas, comme le conditionnement de l'humidité relative augmente, plus l'eau est retenue dans le système de pores et donc l'absorption diminue.

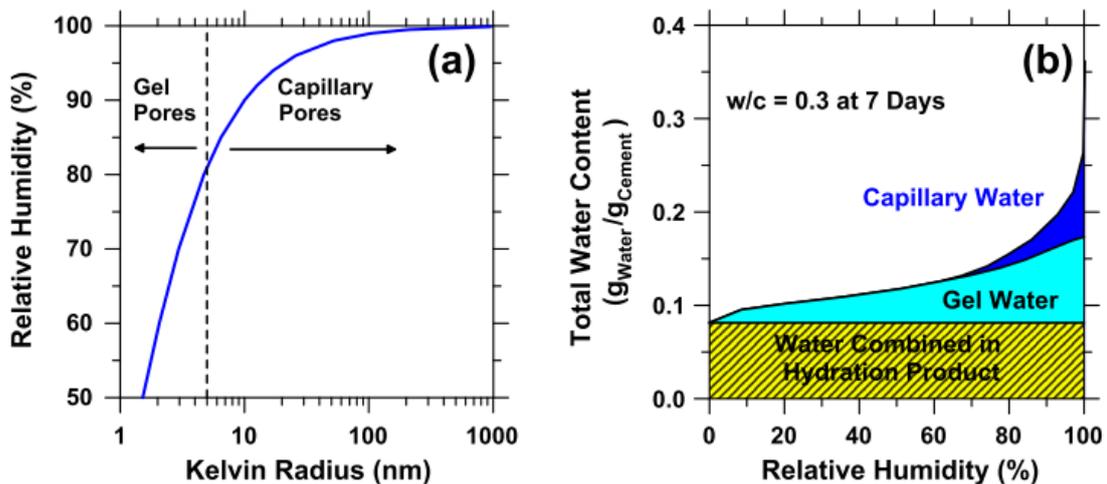


Figure 2. 20: Relation entre l'humidité relative et les pores partiellement vides dans la pâte de ciment (Javier et al. 2011).

En outre, Javier et al. (2011) montrent que des échantillons préparés à différents valeurs d'humidités relative avec un faible rapport E/C (par exemple $E/C = 0.35$) n'atteignent pas des valeurs proches à saturation même après 90 jours d'immersion dans l'eau (Figure 2.21). Il peut être attribué au réseau de pores affiné de ce système de faible humidité, ce qui rend difficile la circulation de l'eau dans l'échantillon remplir tous les pores. Ceci est communément appelé la déformation, qui se produit après différents temps d'hydratation pour différents E/C.

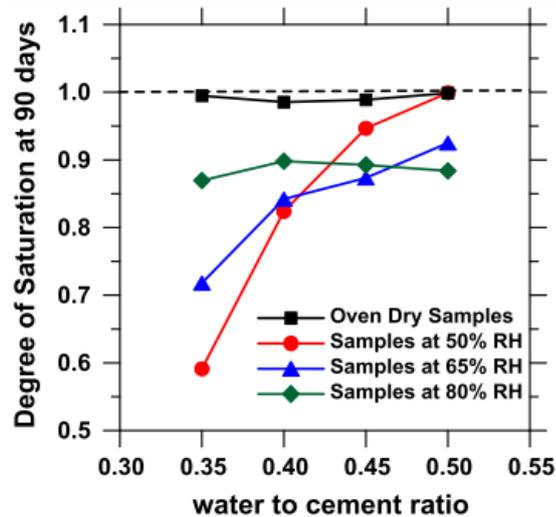


Figure 2. 21: Degré de saturation après 90 j au contact de l'eau en fonction de E/C (Javier et al. 2011).

2.6.5 Perméabilité

La durabilité du béton est influencée principalement par sa capacité à résister à la pénétration des liquides, des sels agressifs et des gaz et dépend en grande partie de sa perméabilité. Dans le cas du béton armé, la pénétration de l'humidité, des gaz ou des sels agressifs peut entraîner la corrosion de l'acier d'armature et la destruction du béton d'enrobage.

La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de sa porosité, mais c'est fonction de la distribution des tailles et de la continuité de la structure des pores (Neville 1983). Cela peut être aperçu lors de la comparaison de la pâte de ciment au gel de ciment, même si la porosité de la pâte de ciment peut ne pas être très différente de celle du gel (selon le rapport eau/ciment), sa perméabilité est environ 20 à 100 fois supérieure en raison de la présence de capillaires (Neville 1983).

Goto et al. (1981) ont montré que la perméabilité à 60 °C était supérieure à celle de 27 °C, même si la porosité était plus petite. Cette observation était valable pour tous les rapports E/C utilisés, de 0,35 à 0,45. Cette tendance était due aux pores de plus grand diamètre résultant des températures élevées. Cependant, les ciments mélangés par des cendres volantes et du laitier de haut Fournaux se comportent de manière inverse, des températures plus élevées entraînant des perméabilités plus faibles. Les résultats de Bakker (1983) ont montré qu'à 20

°C, le mélange de (CV) était le plus perméable des trois bétons étudiés, mais lorsqu'il était durci à 80 °C pour seulement 18 heures, il est devenu supérieur au mélange de CPA.

2.7 Conclusion

L'objectif de cette revue bibliographique était de présenter un état d'art des travaux et des connaissances acquises sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) par temps chaud.

Les résultats rapportés affirment que les températures élevées lors de la confection et la maturation conduisent à une évaporation en phase de malaxage et une accélération de la cinétique d'hydratation du ciment qui entraîne une perte rapide de maniabilité à l'état frais, des augmentations des résistance en compression aux très jeunes âges et des baisses à long terme associées à une altération de certain indicateur de durabilité tel que la Sorptivité.

La plupart des rapports sur les problèmes de détérioration du béton dans les régions intérieures d'Algérie. Les problèmes de mauvaise exécution et matériaux inadéquats sont toujours inclus. Le comportement du béton ou du mortier dans des environnements simulant ceux de conditions du site des régions chaudes d'Algérie n'ont pas été étudiées en profondeur par les chercheurs. La plupart des recherches actuelles portent sur quelques environnements contrôlés. Les effets de la température sur les propriétés des mélanges de ciment ont été principalement examinés dans des environnements entièrement saturés la qualité et le comportement du béton dans les sites réels pourraient être très différents. Par conséquent, une étude de recherche est nécessaire d'étudier l'influence de différents environnements sur les propriétés des bétons autoplaçants.

Le programme d'essais prévu, qui est conçu pour étudier les effets des environnements de cure, similaires à ceux des zones intérieurs de l'Algérie, et les périodes initiales de durcissement sur des BAPs à la base des ciments composés les plus commercialisé en Algérie sera présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 3:

MATÉRIAUX ET MÉTHODES D'ESSAIS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, une description détaillée des essais expérimentaux, la préparation des mélanges et des variables d'étude sont exposés.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau des laboratoires suivants:

- ✓ Laboratoire des Matériaux de Construction du département de Génie de Civil de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- ✓ Laboratoire de génie civil de l'Université de Reims Champagne Ardenne France.

3.2 Les constituants de base

3.2.1 Le ciment

Deux types de ciment composé CEMII-A-42.5 (16% calcaire) et CEMII-A-42.5 (18% pouzzolane) provenant des cimenteries de Chlef et Bénisaf, respectivement. Les propriétés physico-chimiques des deux ciments sont conformes à la norme [EN 197-1 \(2000\)](#) et sont regroupées dans le [Tableau 3.1](#). Les données présentées sont celles fournies par les fabricants.

Tableau 3.1: Propriétés physico-chimiques des ciments composés utilisés.

Constituant	Masse (%)	
	CEMII-A-L-42.5	CEMII-A-P-42.5
SiO ₂	18.25	23,44
Al ₂ O ₃	4.48	5,47
Fe ₂ O ₃	3.28	2.83
CaO	62.38	60,49
MgO	0.94	0.39
CaO _{libre}	0.70	0.66
SO ₃	2.00	2.46
Perte au feu	7.38	2,94
C ₂ S	18.68	11.97
C ₃ S	58.20	67.19
C ₃ A	7.55	8.13
C ₄ AF	11.43	9.30
SBB (cm ² /g)	3500	3700

3.2.2 Filler calcaire

Le filler calcaire est l'addition calcaire la plus utilisée en Algérie pour la fabrication des ciments composés, compte tenu de sa disponibilité et de son faible coût. C'est pourquoi un filler calcaire a été utilisé dans cette étude. L'appellation de filler calcaire vient du fait

que cette addition, si elle est broyée assez finement à partir d'une roche calcaire, s'insère dans le squelette granulaire du ciment 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.

Le filler calcaire employé est issu d'un site de production de la cimenterie de Chlef; il est conforme à la norme sur les additions minérales calcaires (NF P18-508). L'analyse par diffractogramme (DRX) du calcaire est donnée par la Figure 3.1.

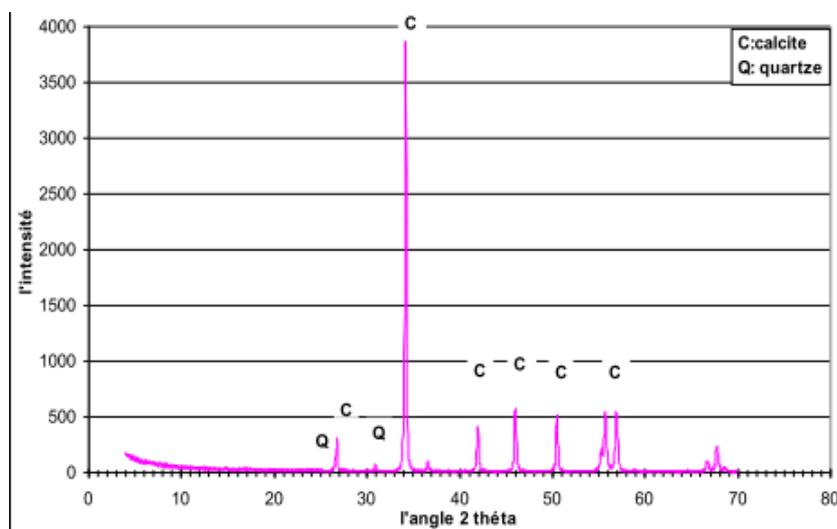


Figure 3.1: Analyse par diffraction aux rayons X du calcaire (Salhi 2012).

3.2.3 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Bouhamidi à Bénisaf. Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie de diamètres variant de 5 à 10mm. L'analyse chimique de la pouzzolane est donnée dans le Tableau 3.2 et l'analyse par DRX par la Figure 3.2. L'analyse chimique de la pouzzolane de Benisaf montre qu'elle peut être considérée comme un matériau pouzzolanique d'après les normes en vigueur. La norme ASTM C618 exige que la somme des teneurs ($Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$) soit supérieure à 70 %.

Tableau 3.2: Analyse chimique de la Pouzzolane.

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
(%)	45,67	15,48	9,12	8,98	3,99	0,6	0,4	3,2	9,85

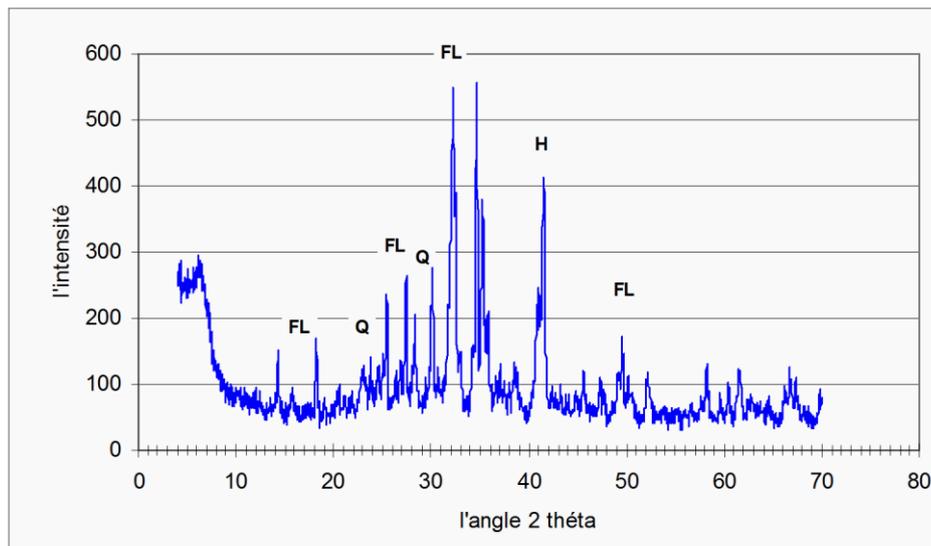


Figure 3.2: Analyse par diffraction X de pouzzolane (Salhi 2012).

3.2.4 Phase granulaire

Un type de sable et un type de gravier ont été utilisés dans cette étude, un sable naturel 0/4 provenant de Oued Ras région de Chlef (Algérie). Un gravier concassé 6/14 provenant d'une carrière de la région de Chlef. Leurs principales propriétés sont récapitulées dans le Tableau 3.3 et leurs granularités sont présentées sur la Figure 3.3.

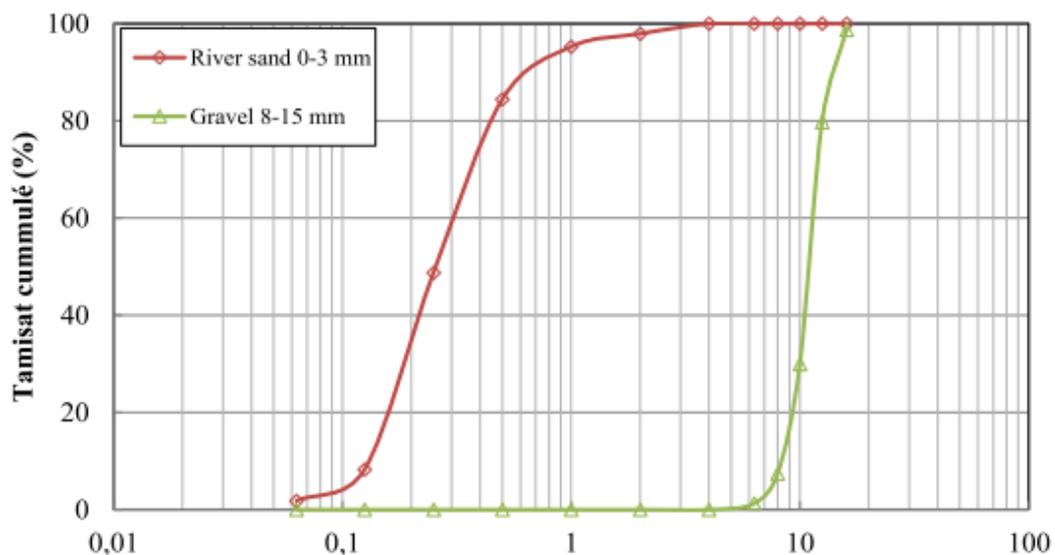


Figure 3.3: Granulométrie des granulats fins et grossiers.

Tableau 3.3: Propriétés du sable et gravier utilisé.

Propriété	Sable	Gravier
Densité	2.4	2.5
Module de finesse	1.6	/
Absorption (%)	0.7	/

3.2.5 Superplastifiant

L'adjuvant employé est un superplastifiant Sika Viscocrete Tompo 12. Il est produit par la société Sika Algérie et est particulièrement adapté aux applications autoplaçantes. Il se présente sous la forme d'un liquide brun avec une densité de 1,06, une teneur en chlorures inférieure à 0,1% et des extraits secs entre 28,0 et 31,0%. Le dosage peut varier de 0,2 à 3% selon la fluidité et les performances recherchées. Les principales propriétés du produit, données par le fabricant, sont résumées dans le [Tableau 3.4](#).

Tableau 3.4: Propriétés du superplastifiant SIKA Viscocrete Tempo 12.

Densité	1.06±0.01
PH	6±1
Teneur en Na ₂ O _{Eq.}	≤1%
Extrait sec	30.2±1.3%

3.3 Formulation du mortier autoplaçant (MAP)

Dans la littérature, on retrouve un grand nombre d'approches et méthodes de formulation pour les BAPs, nous avons retenu pour notre étude la méthode dite « Japonaise » proposé par [Okamura et al.\(1995\)](#) cette méthode qui est purement expérimentale nous semble très pratique et ne demande pas beaucoup de moyen pour son application.

En utilisant la méthode Japonaise pour formuler un ensemble de béton autoplaçant à dosage en ciment composé, on s'est rendu compte que l'application pure et simple des recommandations de cette méthode ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés. C'est ainsi que nous avons lancé un certain nombre d'investigation, sur mortier autoplaçant (MAP), et bétons pour essayer d'adapter la méthode pour l'obtention de bétons qui répondent aux exigences d'une bonne fluidité, une stabilité accrue et une capacité de remplissage satisfaisante.

On reprendra dans ce paragraphe les fondements de la méthode japonaise exposés au (§1.5.1, chapitre 1) et que nous développerons en détails.

Okamura et Ozawa (1995) ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants.

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50% de leur compacité. On note que les auteurs ne précisent pas comment a été mesurée la compacité des gravillons. Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

De même, afin d'assurer une ouvrabilité suffisante au mortier, ils fixent le volume de sable égal à 40% du volume total du mortier. Il est important de noter que les auteurs excluent du terme sable toutes les fines inférieures à 90 μm , qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants.

L'optimisation de la pâte s'effectue sur les mortiers dont la teneur volumique en sable est égale à 40%. Ces mortiers sont caractérisés conjointement par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir (Figure 3.4).

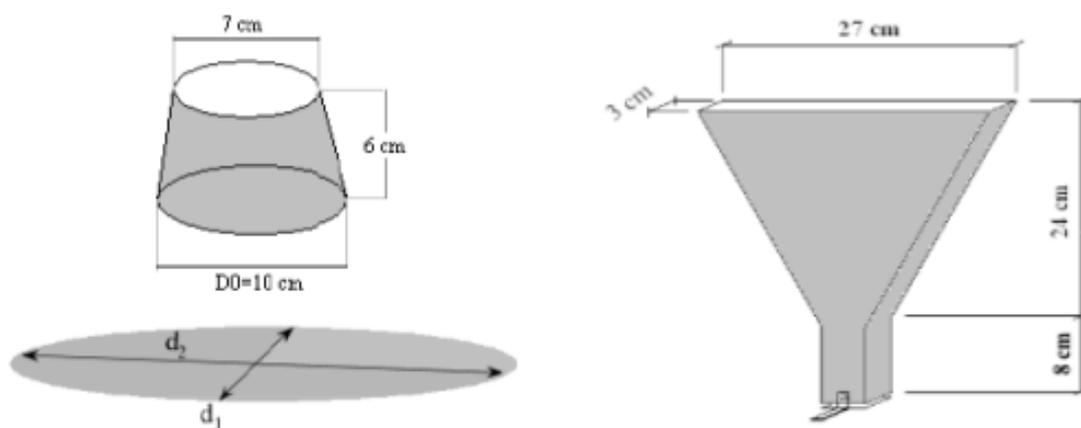


Figure 3.4: Dimensions du cône et l'entonnoir à mortier (RILEM 2001).

A partir de ces essais, les auteurs tirent deux grandeurs adimensionnelles :

$$\checkmark \text{ L'étalement relatif } \Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (3.1)$$

$$\checkmark \text{ La vitesse relative d'écoulement : } R_m = \frac{10}{t} \quad (3.2)$$

Cette approche de formulation présente l'intérêt de sa simplicité. Toutefois, aux dires même de ses inventeurs (Okamura1995), elle est très sécuritaire. Il faut comprendre que le volume de gravillon est sous-estimé 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 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 (Sedran1999).

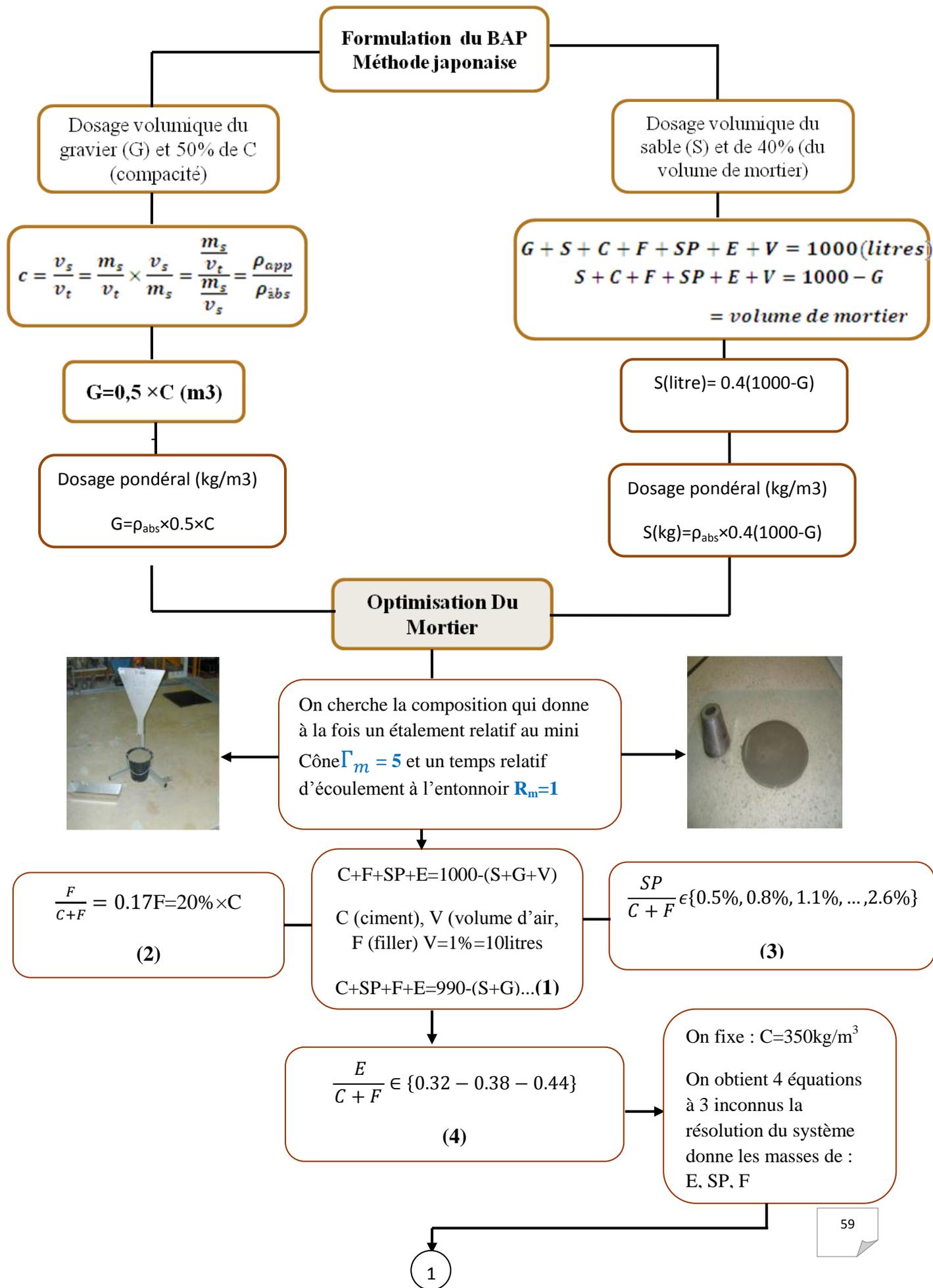
Il serait important de noter que la marge de sécurité prise pour donner à la méthode un caractère général doit conduire à des bétons trop riches en pâte, donc coûteux et présentant des risques accrus de déformations différées (Sedran1999).

Dans notre étude trois rapports $E/Liant \in \{0.32 - 0.38 - 0.44\}$ ont été utilisés pour avoir trois classes de résistance, les quatre types de ciment utilisés sont mentionnés ci-dessus.

Trois formulations BAP32, BAP38 et BAP44 découlent de l'approche japonaise brièvement présentée dans l'organigramme Figure 3.6. Les trois BAPs, incorporant les deux ciments locaux CEMII-A-C42.5 et CEMII-A-P42.5, l'un de la cimenterie de Chlef qui est substitué de 16% du calcaire et l'autre de l'usine de Bénisaf avec une teneur de pouzzolane qui varié de 18 % aussi afin d'appréhender l'effet des deux ajouts, l'ajout inerte (calcaire) et l'ajout actif (pouzzolane) sur le comportement des bétons autoplaçant par temps chaud.

Tableau 3.5: Composition des BAPs.

Matériaux (kg/m ³)	BAP-C32	BAP-C38	BAP-C44	BAP-P32	BAP-P38	BAP-P44
E/L	0.32	0.38	0.44	0.32	0.38	0.44
Ciment (C)	624.4	572.2	527.8	624.4	572.2	527.8
Sable 0/4	757.7	722.2	694.5	757.7	722.2	694.5
Gravillon (6/14)	770.0	700.0	722.2	770.0	700.0	722.2
Eau	199.8	215.7	232.2	199.8	215.7	232.2
SP	14.2	7.8	5.0	14.2	7.8	5.0



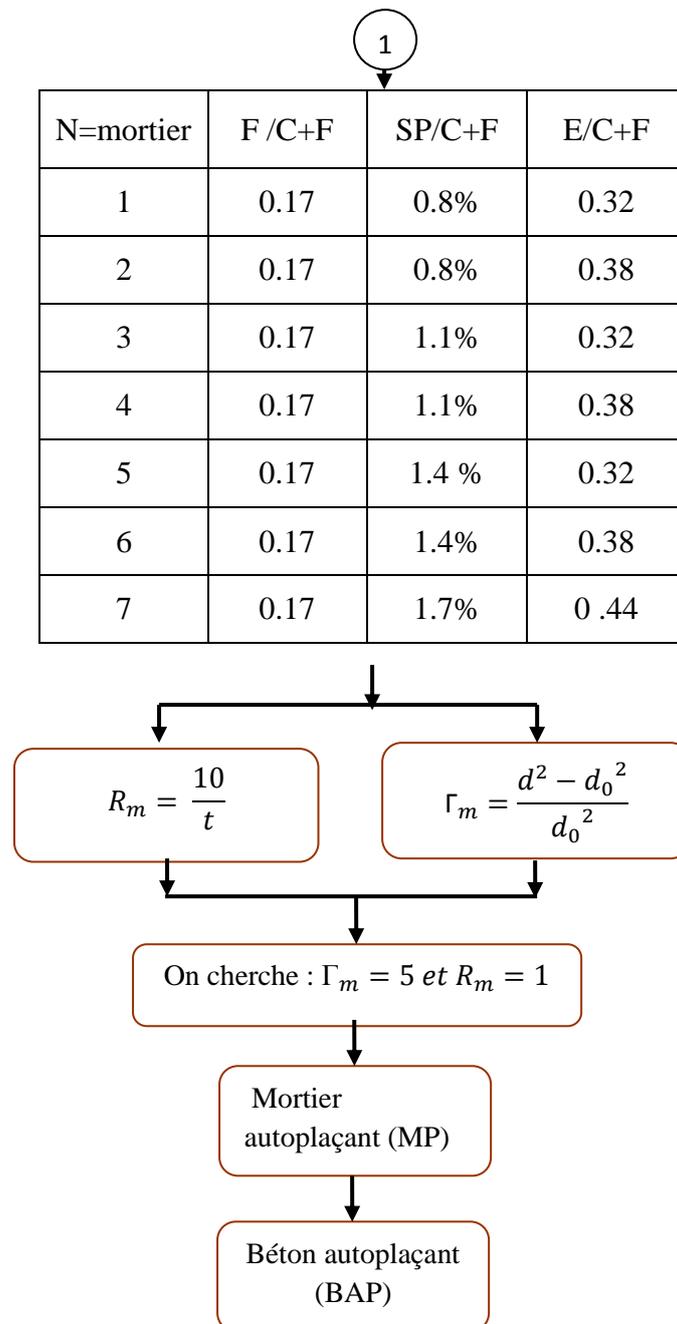


Figure 3.6: Organigramme représentatif des différentes étapes de formulation du BAP par la méthode Japonaise.

3.4 Déroulement des essais

3.4.1 Préparation des constituants en fonction de la température

La température du laboratoire pendant l'été (saison estivale) varier entre 30-40°C. Dans le but d'atteindre la température initiale de 35°C ± 2°C en fin de malaxage, il est choisi d'associer les constituants (ciment, granulats) à des températures réelles de chantier par temps chaud (35-40°C). Sans tenir compte de la chaleur de dissolution dégagée dès les premiers instants de contact entre le ciment et l'eau, et de la chaleur dissipée durant le

malaxage, la température initiale du béton peut être calculée simplement à partir de la chaleur dégagée, exprimée en fonction de la température des constituants, de leur masse dans la composition de béton et de leur chaleur spécifique. Quelle que soit la formulation (BAP32, BAP38 ou BAP44), la valeur visée de 30-35°C peut être atteinte avec des températures de constituants réalistes dans la pratique :

Eau : 20-25°C un ordre de grandeur normale pour la distribution de l'eau potable en période estivale ;

Ciment : 30-35°C la fourchette de la température de stockage du ciment à l'abri du soleil ;

Granulats : 30-40°C ce qui peut être la température des granulats (sable et gravillons) exposés au rayonnement solaire.

Ce qui donne une température du mélange 30-35°C en fin de malaxage, le ciment, l'eau et le superplastifiant sont introduit dans le mélange à la température de laboratoire.

3.4.2 Mise en place des constituants

L'eau est pesée juste avant le gâchage, la quantité souhaitée étant prélevée depuis un réservoir placé à l'intérieur de laboratoire.

Les granulats sont d'abord étuvés à 105°C durant 48 heures afin de rendre nulle leur teneur en eau; ils sont ensuite, soit placés à l'intérieur de laboratoire ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) durant 48 heures avant le malaxage, soit maintenus 48 heures supplémentaires à l'extérieur de laboratoire (Climat chaud réel pendant l'été) conditions climatique du chantier, puis inclus dans le mélange.

3.4.3 Malaxage et maintien d'autoplaçance

Chaque gâché (25 litres) est réalisée dans un malaxeur à axe vertical. Les séquences de malaxage sont comme suit :

- Nettoyage de la cuve ;
- Introduction des constituants solide en commençant par les graviers, puis le ciment, et en finissant par le sable ;
- Malaxage à sec pendant 1 minute ;
- Introduction de 2/3 de l'eau pendant 1 minute ;
- Introduction du 1/3 de l'eau restant mélangé avec le superplastifiant pendant 1 minute ;
- Ont continué le malaxage pour 2 minutes supplémentaires.

3.5 Essais à l'état frais

3.5.1 Etalement

Le test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 500mm. Le temps mis par le béton pour atteindre un diamètre de 500mm (T_{500}) est d'abord mesuré; il renseigne sur la vitesse de mobilité du béton. A l'arrêt de l'écoulement, la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton est obtenue. L'étalement final renseigne sur la déformabilité du béton.

Trois classes d'étalement sont définies par la norme [EN 206-9\(2010\)](#) prévoit une répartition des BAPs en trois classes ([Tableau 3.6](#)). Deux classes de temps d'écoulement T_{500} sont définies ([Tableau 3.7](#)).

Tableau 3.6: Classe d'étalement.

Classe	Etalement en (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Tableau 3.7: Classes de temps d'écoulement T_{500} .

Classe	T_{500} en (s)
VS1	<2.0
VS2	≥ 2.0

3.5.2 J-Ring

L'essai j-ring est conforme à la norme [ASTM C 1621](#). On utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé. Il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. D'après l'[ASTM C1621](#), $d_{moy} - d_{moy (J-Ring)} \leq 50\text{mm}$.

3.5.3 V-Funnel

Pour l'essai V-funnel, cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant ([EFNARC 2005](#)). Il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps

d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit l'orifice d'après [EFNARC 2005](#) le temps d'écoulement T_v doit être compris entre 6 s et 12 s.

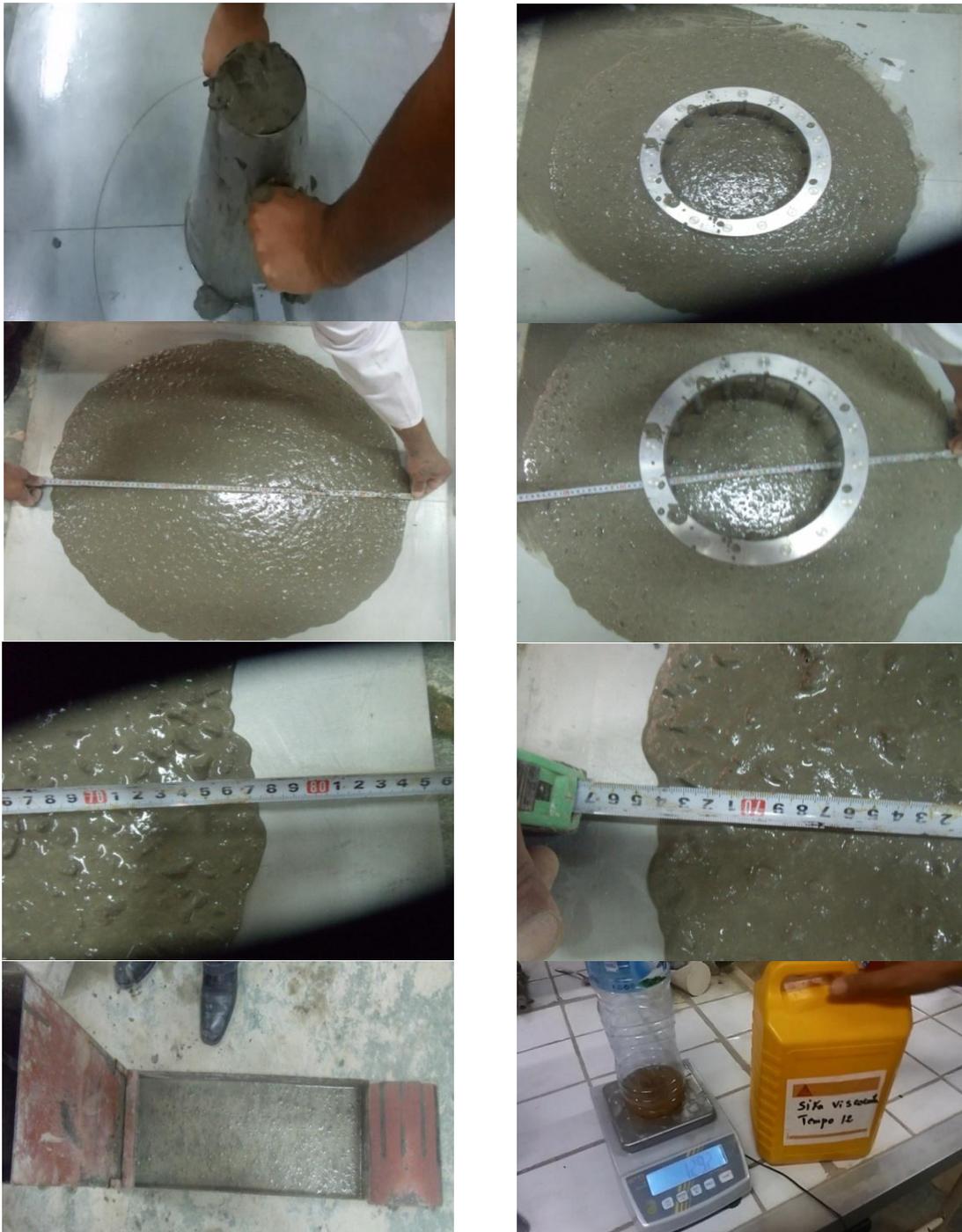


Figure 3.7: Essais de caractérisation du BAP

3.5.4 Boite en L

Cet essai (Figure 3.8) permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures en mesurant le taux de remplissage H_2/H_1 (hauteur atteinte en partie horizontale/hauteur atteinte en partie verticale) et le temps d'écoulement T_{55} du béton à la ligne des 55 cm depuis la paroi verticale.

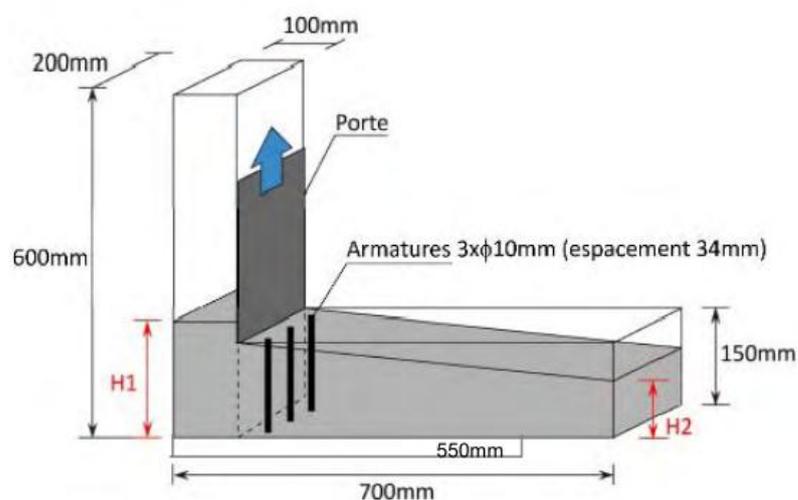


Figure 3.8: Essai à la boîte en L.

Il existe deux classes (EN 206-9) en fonction du nombre d'armature (2 ou 3) avec un ratio minimal fixé à 0,80 (Tableau 3.8).

Tableau 3.8: Classes d'aptitude à l'écoulement - boîte en L.

Classe	Taux de remplissage
PL1	≥ 0.80 avec 2 armatures
PL2	≥ 0.80 avec 3 armatures

3.5.5 Stabilité au tamis

Le test de stabilité au tamis permet de qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure 3.7f). Si les capacités de remplissage et de passage sont primordiales pour l'aspect autoplaçant du béton, il faut également que le béton soit suffisamment homogène et stable une fois mis en place pour que ses propriétés à l'état durci soient conformes aux attentes.

Deux classes sont définies (Tableau 3.9) 5NF EN 206-9).

Tableau 3.9: Classe de résistance à la ségrégation

Classe	Pourcentage de laitance
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

3.5.6 Masse volumique apparente

La densité du BAP à l'état frais est déterminée selon la norme [ASTM C138](#).



a) Confection du BAP



b) Test d'étalement



c) Test J-Ring



d) Test V- funnel



e) Essai L-box



f) Stabilité au tamis

Figure 3.9: Tests du BAP à d'état frais.

3.6 Préparation des éprouvettes

Le contrôle du BAP à l'état frais a été effectué par des tests au cône d'Abrams, T_{500} , J-Ring, V-Funnel, L-Box et la stabilité au tamis. Après avoir obtenu un BAP, le béton se met dans des moules cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ couvert d'un plastique. Après 24 heures, les éprouvettes ont été retirés des moules et conservées en cinq groupe afin d'étudier l'effet de la durée de cure humide initiale sur les propriétés des BAPs. Les cinq modes de cure sont mentionnés dans le [Tableau 3.10](#).

Tableau 3.10: Modes de cure des trois BAPs.

Codes d'éprouvettes	Mode de cure	Durée de cure (jour)		
		Moule	Eau	Climat chaud
		30-35°C	24-28°C	35-48°C HR 50-65%
E3	Complètement dans l'eau	1	3	0
E3-7	Partiellement dans l'eau	1	3	4
E3-28	Partiellement dans l'eau	1	3	25
E3-90	Partiellement dans l'eau	1	3	87
E7	Complètement dans l'eau	1	7	0
E28	Complètement dans l'eau	1	28	0
E90	Complètement dans l'eau	1	90	0
E7-28	Partiellement dans l'eau	1	7	21
E7-90	Partiellement dans l'eau	1	7	83
E14-28	Partiellement dans l'eau	1	14	14
E14-90	Partiellement dans l'eau	1	14	76
CC3	Complètement dans l'air	1	0	3
CC7	Complètement dans l'air	1	0	7
CC28	Complètement dans l'air	1	0	28
CC90	Complètement dans l'air	1	0	90

Ex : les échantillons immergés dans l'eau pendant x jours ;

Ex-y : les échantillons immergés dans l'eau pendant x jours puis dans le climat chaud (y-x) jours (exemple : E7-28 : 7 jours dans l'eau puis 28-7=21 jours dans le climat chaud) ;

CCx: les échantillons ont été exposés au climat chaud pendant x jours.

3.7 Caractérisation à l'état durci

La maturation du béton dans les modes de cure cités ci-dessus peut avoir des effets sur les propriétés mécaniques et sur les propriétés de durabilité. Il est nécessaire de quantifier ces effets en mesurant un certain nombre de propriétés du béton à l'état durci.

3.7.1 Essais mécaniques

La résistance à la compression est déterminée conformément à la norme (EN 12390-3). Nous avons utilisé, pour cet essai, des éprouvettes cubique $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. La charge est appliquée sur les éprouvettes par une presse hydraulique de 3000 KN contrôlée en force. La vitesse de chargement est égale à 0,5 MPa/s. Pour chaque échéance (3 jour, 7 jours, 28 jours ou 90 jours) et pour chaque gâchée, la résistance en compression calculée correspond à la moyenne des résistances obtenues sur 3 éprouvettes.



Figure 3.10: Machine de compression.

3.7.2 Essais non destructifs (CND)

Les essais non destructifs donnent des mesures indirectes (le Rebond, la vitesse d'impulsion ultrasonique,...) qui ne sont pas reliées directement aux propriétés des bétons (Breysse et al. 2011). En outre, les données fournies par ces essais sont très difficiles à interpréter, malgré plusieurs travaux visant à améliorer les essais non destructifs se poursuivent. Ceci est dû aux problèmes de précision des techniques d'application, d'étalonnage des appareils et de l'hétérogénéité du matériau (Balayssac et al. 2009; Feidman 2005).

Il existe une très grande variété de méthodes non destructives permettant d'évaluer de nombreuses caractéristiques du béton (propriétés mécaniques, humidité, perméabilité, absorption, etc.). Les techniques de CND: le scléromètre et l'ultrason sont les plus couramment choisis pour l'estimation non destructive de la résistance du béton (Breysse 2012).

4.7.2.1 Rebond (*marteau de rebondissement de Schmidt*)

a) Principe fondamental

Le scléromètre est principalement un appareil de contrôle de la dureté d'une surface de béton durci. Il travaille sur le principe que le rebondissement d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface. Plus la distance de rebondissement est grande, plus la surface essayée est dure. Il y a peu de rapport théorique apparent entre la résistance du béton et l'indice de rebondissement du marteau. Cependant, avec des limites, des corrélations

empiriques ont été établies entre les propriétés de résistance et l'indice de rebondissement (Khan 2002).

b) Description de l'appareil

Le scléromètre le plus adapté au béton ordinaire est le marteau de rebondissement de Schmidt de modèle N (Figure 3.11). Il pèse environ 1.8 kg et convient aux essais en laboratoire comme aux essais sur chantier. Les composants principaux incluent dans le corps : la tige de percussion, la masse du marteau et le ressort principal. D'autres dispositifs y incluent : un mécanisme de verrouillage qui ferme la masse du marteau à la tige et un curseur coulissant pour mesurer le rebondissement de la masse du marteau. La distance de rebondissement est mesurée sur une échelle arbitraire marquée de 10 à 100. La distance de rebondissement est enregistrée comme un "indice de rebondissement" correspondant à la position du curseur sur l'échelle (Khan 2002). Une enclume de calibrage en acier permettant le calibrage du marteau, caractérisée par une dureté minimale de 52 HRC, une masse de (16 ± 1) kg, et un diamètre approximatif de 150mm.

c) Procédé de mesurage

Avant de procéder à une série d'essais sur une surface de béton, des relevés sur l'enclume de calibrage doivent être effectués et enregistrés, puis vérifiés afin de s'assurer que les résultats obtenus sont compris dans la gamme de valeurs recommandées par le fabricant. Dans le cas contraire, il doit être procédé au nettoyage et au réglage du scléromètre. De même, après la réalisation des essais, des relevés doivent être effectués au moyen de l'enclume de calibrage, puis enregistrés et comparés aux valeurs relevées avant essai. En cas de différence, il doit être procédé au nettoyage et au calibrage du scléromètre, puis au renouvellement de la série d'essais (EN 12504-2 2003).

Pour préparer l'instrument à l'essai, Le marteau doit être actionné au moins trois fois avant de procéder à la lecture d'une série de résultats, afin de s'assurer d'un fonctionnement correct. La lecture est très sensible aux variations locales dans le béton, particulièrement à la présence immédiatement de gros granulats et des vides sous la tige lors de l'essai. Il est donc nécessaire de prendre 10 à 12 mesures sur une surface limitée (surface d'essai) et de trouver leur valeur médiane exprimée sous forme de nombre entier (EN 12504-2, 2003; Qasrawi 2000). En éliminant les lectures différentes de la valeur médiane de plus de six unités et ensuite on détermine la médiane pour le reste. Si plus de 20% de l'ensemble des

lectures différent de la valeur médiane de plus de six unités, l'ensemble des lectures doit être écarté.

3.7.2.2 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonore)

La méthode de la vitesse d'impulsion ultrasonique a été également utilisée dans cette étude afin de déterminer l'homogénéité du béton, la présence de fissures ou de vides, les changements de propriétés dans le temps et des caractéristiques physiques et dynamiques.

Pendant les essais expérimentaux, le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton est enregistré et la vitesse va être calculée par l'équation 3.3 (Qasrawi 2000).

$$V=L/T \quad (3.3)$$

Où: V: la vitesse d'impulsion (m/s);

L: la longueur du parcours (m);

T: le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (s).

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité comme il a été décrit dans le Tableau 3.11 (Feidman 2005).



a) Rebond



b) Vitesse Ultrasonore

Figure 3.11: Mesures non destructifs.

En outre, les résultats obtenus par la méthode combinée (scléromètre - ultrason) lors de la corrélation avec la résistance à la compression donnent généralement un coefficient de corrélation plus élevé et une erreur type moins élevée comparativement aux méthodes uni paramétriques (Breysse et al. 2009). Le principe de l'estimation de la résistance à la

compression du béton par la méthode combinée des deux dispositifs de mesure (scléromètre - ultrason) consiste à établir une courbe de corrélation donnant la variation de la résistance du béton en fonction de l'indice de rebondissement et de la vitesse ultrasonique.

Tableau 3.11: Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion.

Vitesse de propagation des impulsions (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500 - 4500	Bonne
3000 - 3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

a) Procédé de mesurage

L'opération est relativement simple mais exige un grand soin afin d'obtenir des résultats fiables. Avant de procéder aux essais à l'ultrason, il faut prendre soin de vérifier toujours le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage.

Lors d'essai, il faut assurer un bon accouplement acoustique entre la surface du béton et la face du transducteur, en utilisant un produit de couplage tel que la vaseline, le savon liquide ou la graisse pour éliminer complètement les poches d'air. Il est important que cette couche de séparation doive être mince autant que possible. Pour les surfaces lisses, il convient d'appliquer sur elle une couche mince de la vaseline ou le savon liquide, mais une graisse plus épaisse est recommandée pour les surfaces qui n'ont pas été coulées contre des surfaces lisses d'un coffrage. Si la surface du béton est très rugueuse et irrégulière, il convient de la polir et de l'égaliser par ponçage ou à l'aide d'une résine époxy à prise rapide. Il est recommandé d'appuyer fermement les faces des transducteurs contre les surfaces du béton jusqu'à la stabilité du temps affiché. Il est également important que les lectures soient répétées par le déplacement et la ré application des transducteurs jusqu'à l'obtention d'une valeur minimale du temps mesuré, avec une attention spéciale à l'élimination de n'importe quelle autre source de vibration, même de manière légère, pendant l'essai (Bungey et al. 2006).

3.8 Module d'élasticité

Le module d'élasticité est déterminé aux échéances de 28 et 90 jours suivant les recommandations (RILEM CPC8). Les essais sont conduits sur des éprouvettes cubique ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$). Le module d'élasticité dynamique a été mesuré selon la norme ASTM C469. L'équation suivante est utilisée pour représenter le module d'élasticité dynamique du béton.

$$E_d = 10^5 \times V^2 (\Delta / g) \quad (3.4)$$

Où : E_d est le module d'élasticité (GPa) ;

V est la vitesse d'impulsion ultrasonique (m/s) ;

Δ est la masse volumique (kg/dm^3) ;

g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$).

3.9 Essais de durabilité

3.9.1 Absorption capillaire

L'essai de Sorptivité permet de mesurer le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des éprouvettes de béton, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Nous avons utilisé la méthode citée par Ghrici et al.(2007). Avant les mesures de la Sorptivité, les éprouvettes ont été pré-conditionné dans l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai d'absorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cubique $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (Figure 3.10). La surface latérale de chaque éprouvette est enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai. L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes ont été immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide de cales (Figure 3.11). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées, puis replacées dans le récipient. On mesure ensuite l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps à 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes. Les échéances de mesure sont les suivantes : 28 jours et 90 jours suivant les différents modes de cure.

Le coefficient de Sorptivité (S) peut être estimé en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{Q}{A} = S \cdot \sqrt{t} \quad (3.5)$$

Avec

Q: la quantité d'eau adsorbée en cm^3

A: la surface du spécimen en contact avec de l'eau en cm^2 ,

t : le temps en seconde,

S : le coefficient de Sorptivité du spécimen ($\text{cm} / \text{S}^{1/2}$).

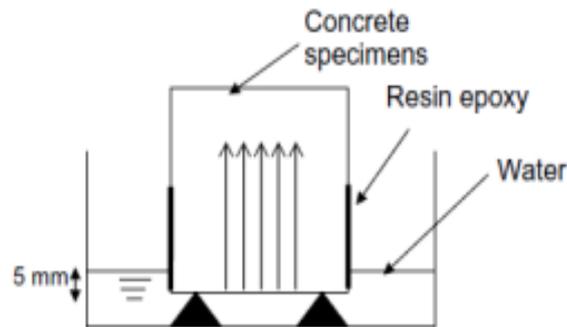


Figure 3.12: Schéma de l'essai d'absorption de l'eau



a) Etuvage des éprouvettes



b) Préparation des éprouvettes



c) dispositif d'essai d'absorption



d) essai d'absorption

Figure 3.13: Les étapes d'essais d'absorption

3.9.2 Porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité accessible à l'eau a été réalisé selon le mode opératoire recommandé par la norme [ASTM C642](#). La mesure de la porosité totale du BAP est calculée suivant la procédure mentionnée ci-après.

- A l'échéance désirée on doit sécher les éprouvettes de BAP dans une étuve à une température de 100-110°C au moins 24 h jusqu'à la stabilisation de la masse d'éprouvette. Après avoir retiré chaque spécimen de l'étuve, laisser refroidir à l'air sec, à une température de 20 à 25 ° C et déterminer la masse. Désignez cette valeur de pesage A (g).
- Immergez l'échantillon dans l'eau environ 21 °C pendant au moins 48 h, essuyer les éprouvettes en enlevant l'humidité superficielle des surfaces avec une serviette, et déterminer la masse. Désignez la masse après immersion B (g).
- Placez l'échantillon dans un récipient approprié, couvert avec de l'eau du robinet et sous une température de (60-8°C) pendant 5 h. Laissez-le refroidir par perte naturelle de chaleur. Retirer l'humidité de la surface avec une serviette et déterminer la masse de l'éprouvette. Désignez la masse après ébullition C(g).
- Suspendez l'échantillon, après l'immersion et l'ébullition, par un fil et de déterminer la masse dans l'eau. Désignez cette masse apparente D(g). La porosité totale en (%) est calculée par la formule suivante :

$$\text{Porosité Totale (\%)} = \frac{C-A}{C-D} \times 100 \quad (3.6)$$

3.9.3 Absorption d'eau

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton selon l'annexe G de (EN 13369). Les échantillons testés sont des cylindres (□11×h10) cm (trois échantillons par gâchée) débités à partir de cylindres (□11×h22)cm. A échéance d'essai, la surface latérale est protégée par une résine. Les deux faces restantes doivent rester non protégées pour assurer l'imbibition. Les échantillons sont ensuite immergés dans de l'eau potable à une température de 20± 5°C. La phase d'immersion doit durer un minimum de trois jours jusqu'à ce que la masse constante M1 soit atteinte (la différence de masse entre deux pesées effectuées à 24 h d'intervalle est inférieure à 0,1 % de la masse de l'éprouvette).

Les éprouvettes sont ensuite placées dans une étuve au moins 3 jours ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) jusqu'à masse constante M_2 après retour à température ambiante (lorsque la différence de masse entre deux pesées effectuées à 24 d'intervalle est inférieure à 0,1 % de la masse de l'éprouvette). La quantité d'eau absorbée en (%) s'exprime alors comme suit:

$$\text{Absorption (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (3.7)$$

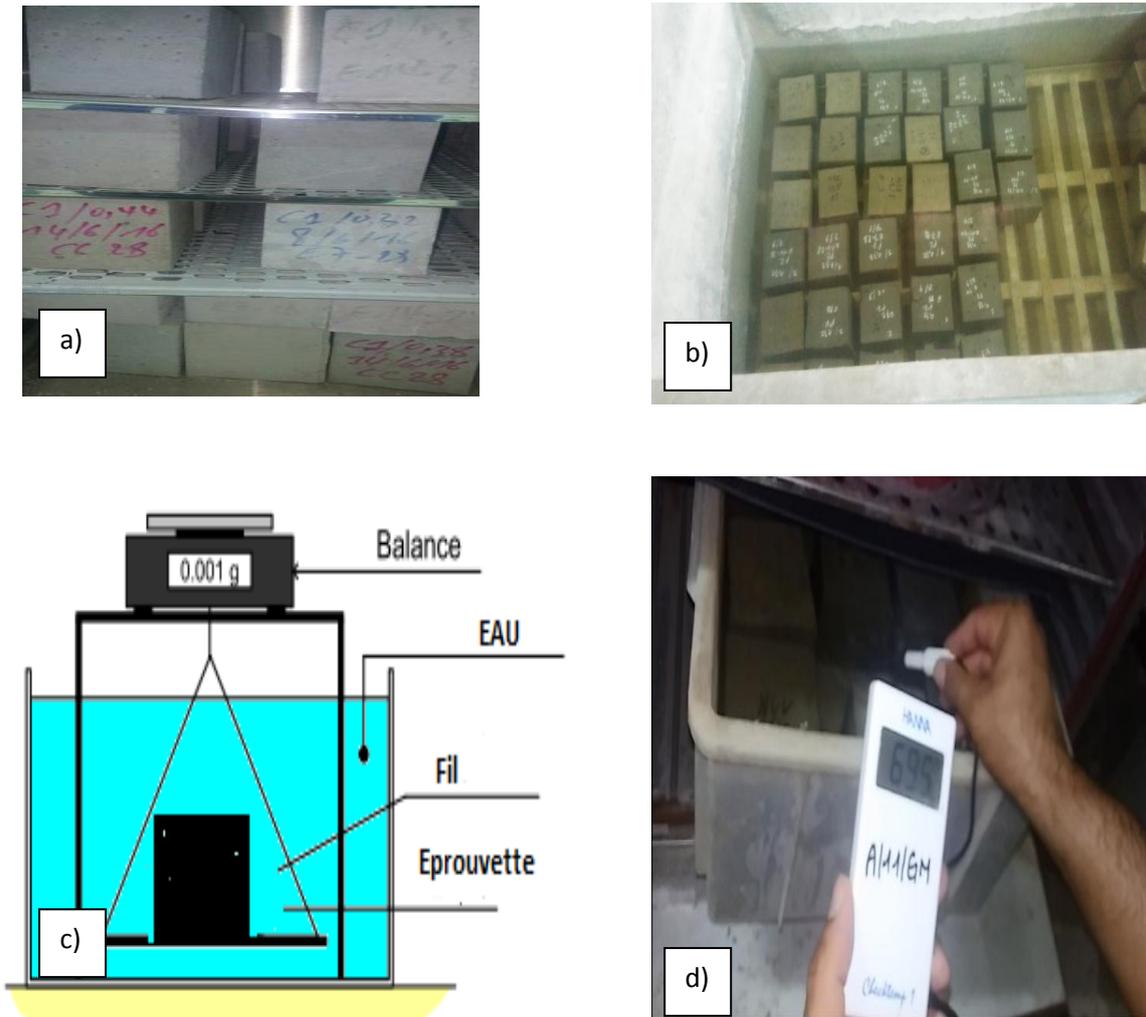


Figure 3.14 : Les étapes d'essai de Porosité accessible à l'eau : a) étuvage 105°C , b) immersion dans l'eau, c) pesage dans l'eau, d) contrôle de la température.

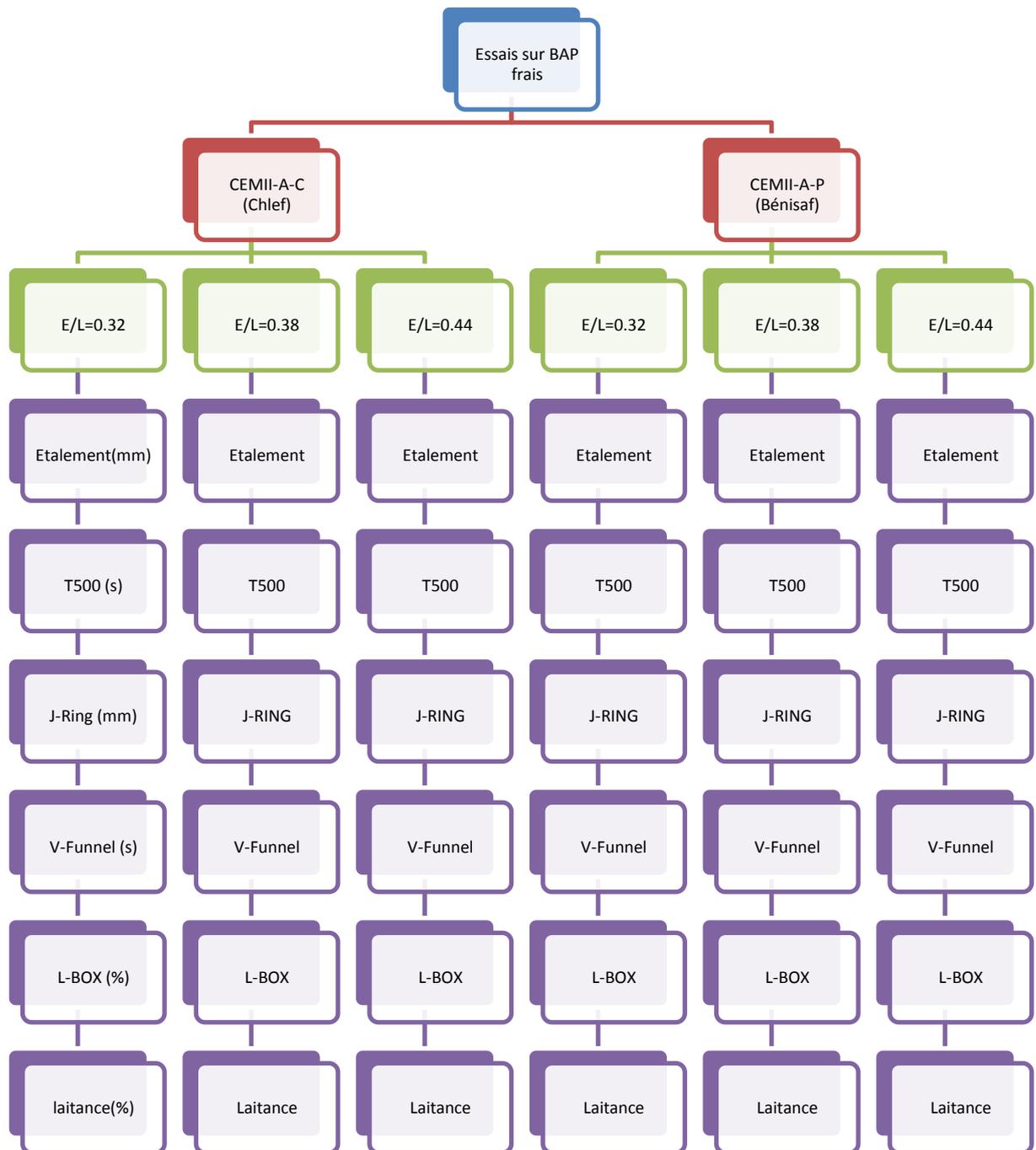


Figure 3.15: Organigramme représentatif des différents Essais de caractérisation de BAP.

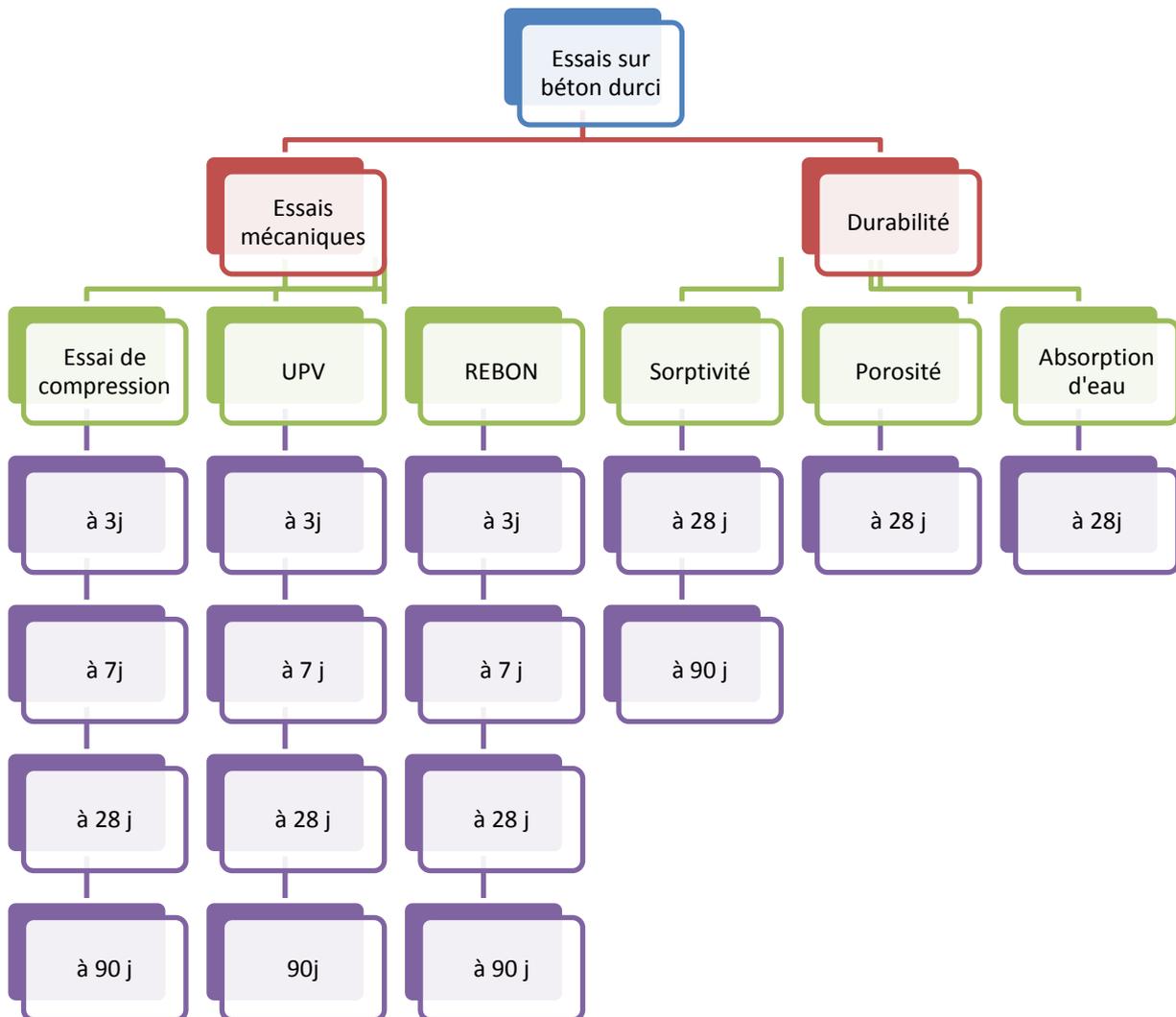


Figure 3.16: Organigramme représentatif des différents Essais sur BAP à l'état durci.

3.10 Conclusion

Ce travail expérimental a pour objectif de comparer les performances mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants. Pour cela, plusieurs formulations de BAPs avec plusieurs rapports E/L ont été étudiées.

L'utilisation des différents matériaux a été justifiée pour la caractérisation du béton autoplaçant par la méthode Japonaise (la plus ancienne) en utilisant deux types du ciment à différents rapport E/L et suivre l'évolution du maintien de l'ouvrabilité avec le temps dans un climat chaud.

Les résultats obtenus ont été présentés et discutés dans les chapitres 4, 5 et 6.

Chapitre 4:

ETUDE DE LA RHÉOLOGIE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

4.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré aux analyses et discussions des résultats obtenus par les différents essais expérimentaux réalisés sur les bétons autoplaçants, à l'état frais.

L'objectif de cette étude est d'abord de formuler un béton autoplaçant par la méthode Japonaise (la plus ancienne) en utilisant des matériaux locaux, en deuxième temps étudier le maintien de l'autoplaçance par temps chaud pour simulé le transport des BAPs par temps chaud. Les résultats des essais rhéologiques retenus pour tester l'autoplaçance sont alors discutés. Ensuite, le calcul des propriétés rhéologiques, tels que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, sont évalués par l'utilisation des expressions empiriques disponibles dans la littérature.

4.2 Résultats des essais d'ouvrabilité

4.2.1 Essai d'étalement

Dans la présente étude, l'étalement était mesuré juste après le malaxage du béton, un ajustement du dosage en superplastifiant était fait afin d'aboutir à l'étalement exigé par la l'EFNARC (2005). Le [Tableau 4.1](#) et la [Figure 4.1](#) récapitulent les résultats des différents essais de caractérisation des BAPs étudiés. Chaque essai rhéologique a été effectué trois fois pour une composition donnée et le résultat représente la moyenne de trois valeurs.

Tableau 4.1: Propriétés des BAPs à l'état frais.

Propriétés à l'état frai		Type de ciment					
		CEMII-A-C			CEMII-A-P		
		BAP-C32	BAP-C38	BAP-C44	BAP-P32	BAP-P38	BAP-P44
Etalement	Diamètre (mm)	750	710	730	765	745	630
	T ₅₀₀ (s)	3.1	2.4	1.6	3.98	1.83	1.37
J-Ring	d _{J-Ring} (mm)	725	710	710	79.5	81	64.5
	(d _{slump} -d _{JRing})(mm)	25	0	20	-30	-65	-15
L-Box	H ₂ /H ₁ (%)	94.4	91.6	80	94.4	93.4	81.5
V-Funnel	T _v (sec)	11	7	4	7.9	4.8	2.75
Laitance	%	14	11	20	19	18	16.4
Masse volumique	Kg/m ³	2375	2327	2223	2420	2410	2346

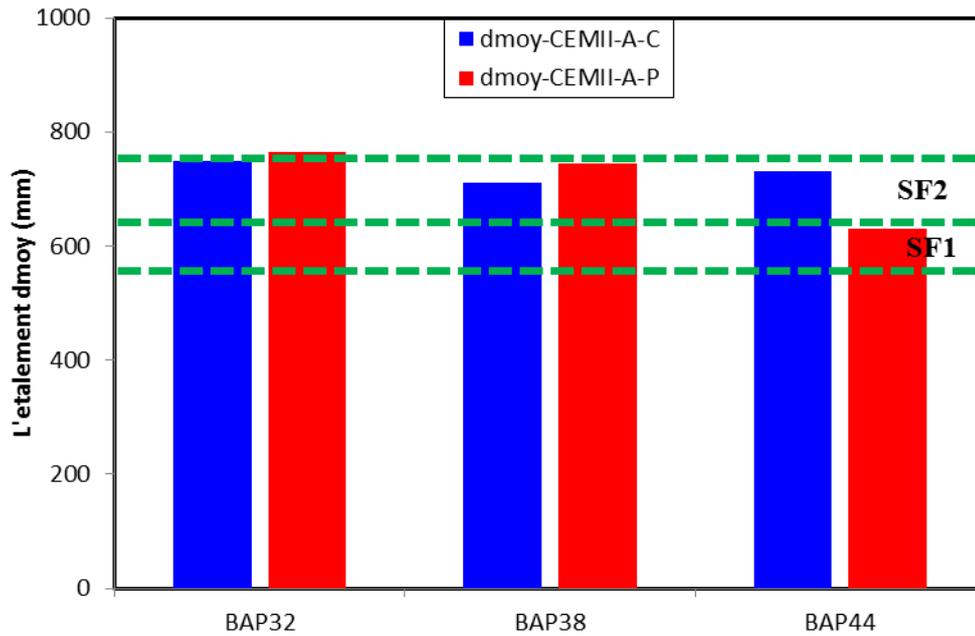


Figure 4.1: Essais d'étalement pour les deux types de ciment

Les résultats obtenus montrent que l'étalement des bétons incorporant le ciment CEMII-A-C (ciment au calcaire) pour les trois BAPs (BAP32C-BAP38C-BAP44C) répond à la classe SF2 (660-750mm) selon l'EFNARC (2005). Ainsi que, pour le ciment CEMII-A-P (ciment à la pouzzolane) les deux BAP (BAP-P32 et BAP-P38) sont conformes à la classe SF2 (660-750mm), d'autre part, le BAP (BAP-P44) répond à la classe SF1.

Selon les recommandations établies par EFNARC (2005), la viscosité peut être évaluée par le temps T_{500} du test de temps d'écoulement ou le test du temps V-Funnel. En outre, les résultats de T_{500} présentés dans la Figure 4.2 sont inclus dans les catégories (VS2/VF2) pour BAP-C32, BAP-C38 et BAP-P32 mais (VS1/VF1) pour BAP-C44, BAP-P38 et BAP-P44. En outre, les valeurs des temps T_{500} sont plus élevées pour les mélanges de BAP avec un rapport E/L inférieur (0.32) indiquant une viscosité plastique plus élevée. Ce résultat est confirmé par d'autres chercheurs (Rahmat et Mousavi 2012). Belaidi et al. (2012) ont montré que le temps d'écoulement augmente en augmentant la teneur de Pouzzolane, indiquant une augmentation de la viscosité.

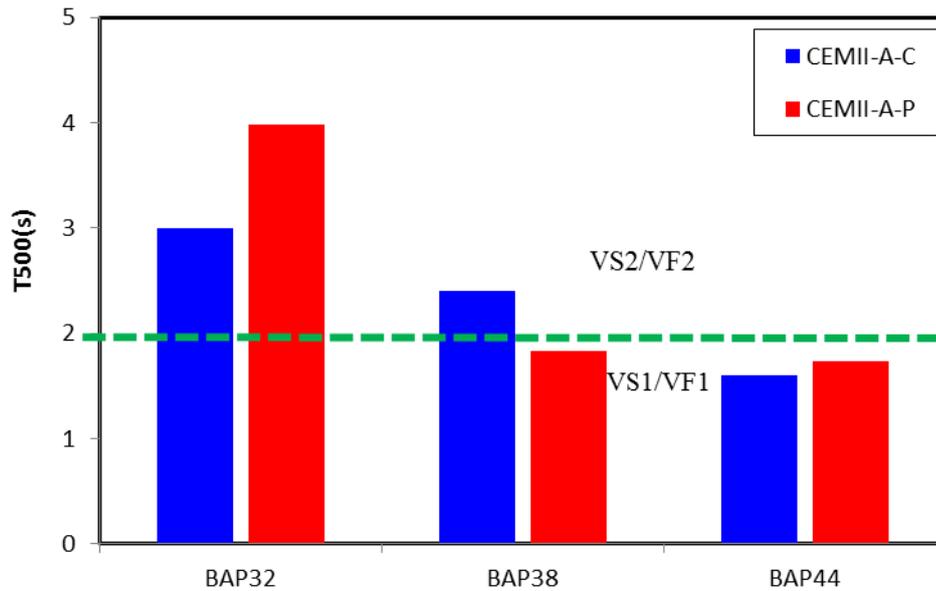


Figure 4.2: Temps pour atteint un diamètre de 500 mm.

Généralement, les mélanges contenant des ajouts minéraux ont montré une meilleure performance que le mélange sans ajout en ce qui concerne l'étalement au cône d'Abrams. L'utilisation des ajouts minéraux dans les BAPs vise à augmenter la distribution des particules du squelette de poudre, et ainsi, réduire les frictions entre les particules. [Belaidi et al. \(2012\)](#) ont étudié l'effet de la pouzzolane (PZ) et de la poudre de marbre (PM) sur les propriétés rhéologique des mortiers autoplaçant (MAP) binaire et ternaire. Leurs résultats montrent que les mélanges de plus de 15% de PZ dans les mélanges binaires ont donné des valeurs d'étalement médiocre, indiquant que la teneur élevée de la pouzzolane substitué au MAP réduit significativement le diamètre d'étalement. Récemment, [Yahiaoui et al. \(2017\)](#) ont analysé l'effet du laitier sur la rhéologie du BAP, ils ont trouvé que l'incorporation du laitier améliore l'ouvrabilité de BAP et entraîne une diminution du seuil de cisaillement, en outre, la viscosité plastique diminué avec l'augmentation de la teneur en laitier. Cependant, [Adjoudj et al. \(2014\)](#) ont montré que le seuil de cisaillement du mortier augmente avec l'augmentation du taux de substitution du laitier et de la pouzzolane naturelle alors que la viscosité diminue.

4.2.2 Essais J-Ring

La capacité de passage des mélanges de BAP est testée avec l'essai J-Ring conformément à la norme [ASTM C1621](#), les valeurs des mesures d'étalement en présence de J-Ring sont présentées dans le [Tableau 4.1](#) et la [Figure 4.3](#). Nous remarquons que l'étalement en présence de J-Ring pour les BAPs incorporant le ciment CEMII-A-P est supérieur à

l'étalement sans J-Ring, selon l'ASTM C1621 le risque de blocage est estimé à travers la différence entre les étalements obtenus au cône, d_{moy} , et au J-Ring, $d_{\text{J-Ring}}$. Ainsi un BAP ne présente pas de risque de blocage si $d_{\text{moy cône}} - d_{\text{J-Ring}} \leq 50\text{mm}$. Tous les BAPs confectionnés respectent les critères de la norme ASTM C1621, le béton est également inspecté visuellement pour évaluer la ségrégation et le blocage.

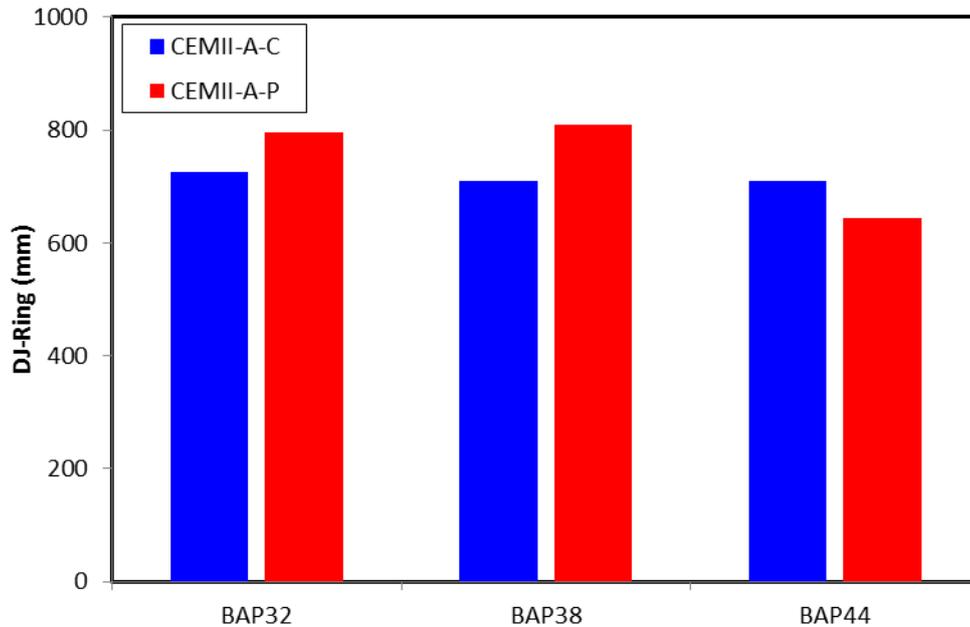


Figure 4.3: Résultats d'essais J-Ring pour les deux types de ciment.

4.2.3 Essai V-Funnel

Nous constatons dans la Figure 4.4 que le temps mesuré par V-Funnel était dans la gamme 2.75 - 11s dépend principalement du rapport E/L et du type de ciment utilisé (addition de type 1 ou de type 2), la valeur minimale du temps d'écoulement mesuré est de 2.75s pour le béton BAP-P44 tandis que la valeur maximale est enregistré pour le mélange BAP-C32. La présence de PZ ou FC dans le système binaire a généralement fait des bétons plus visqueux, cette tendance est en accord avec les travaux de Mehmet et al. (2009). En outre, nous remarquons une diminution du temps V-Funnel avec l'augmentation du rapport E/L pour les deux types de ciment (ajout actifs ou inerte). Nous remarquons aussi que les mélanges de BAP à base de ciment CEMII-A-P présentent des temps légèrement inférieurs que ceux des mélanges incorporant un ciment (CEMII-A-C). D'après la Figure 4.4 on constate que toutes les formulations vérifient les recommandations de l'EFNRAC 2005 (T_v

≤ 12 secondes). Poppe et De Schutter (2001) montrant que le calcaire plus grossier peut conduire à un BAP plus fluide et présente une influence positive sur la viscosité.

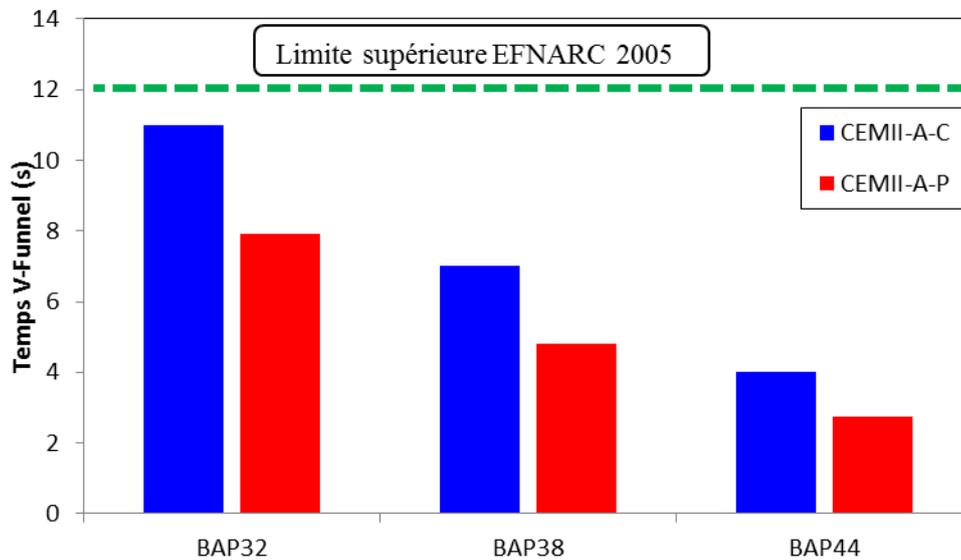


Figure 4.4: Temps V-Funnel mesuré immédiatement après l'essai d'étalement.

4.2.4 Ecoulement à la boîte en L

L'essai de boîte en L (L-Box) caractérise la capacité de remplissage et de passage de BAP. Il existe généralement un risque de blocage du mélange lorsque le taux de blocage de L-box est inférieur à 0,8 (EFNARC 2005). Les rapports de blocage des BAPs produits avec FC et PZ sont donnés dans la Figure 4.5. Le taux de blocage (H_2/H_1) doit être compris entre 0,8 et 1,00.

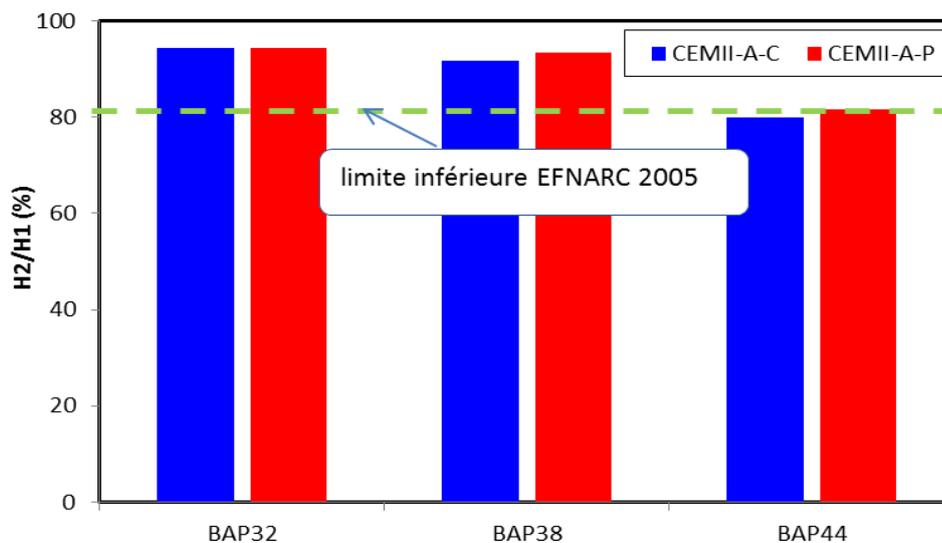


Figure 4.5: Rapports H_2/H_1 obtenu à la boîte en L immédiatement après l'essai V-funnel.

Dans tous les cas des bétons testés, les valeurs de (H_2/H_1) sont supérieures ou égales à 0,8 compte tenu des dispersions obtenues, ce qui classe les bétons dans la catégorie PL2 au sens de la norme [EFNARC \(2005\)](#). Par ailleurs, la capacité de passage à la boîte en L est conservée. Les mélanges BAP-P présentent des rapports (H_2/H_1) légèrement supérieurs aux mélanges BAP-C.

D'après [Topcu et al. \(2009\)](#), l'augmentation du filler calcaire (FC), poudre de marbre (PM) et poudre de Basalte (PB) dans les mélanges de BAP, le rapport de blocage n'est pas affecté négativement en raison de la diminution simultanée de la viscosité

4.2.5 Stabilité au tamis

Les essais issus de la stabilité au tamis montrent que toutes les compositions testées ont une stabilité satisfaisante (laitance $\leq 20\%$). La [Figure 4.6](#) présente le pourcentage de laitance (π) passant au tamis de 5 mm, pour chaque échantillon de béton (10 litres) prélevé à la fin du malaxage et laissé au repos durant 15 minutes.

Nous remarquons que les mélanges de BAP incorporant le ciment CEMII-A-C avec les rapports $E/L=0.32$ et 0.38 présente des pourcentages de laitance inférieur de celle des mélanges de BAP de ciment CEMII-A-P avec les mêmes rapports, tandis que pour le BAP-P44 cette tendance est inversée.

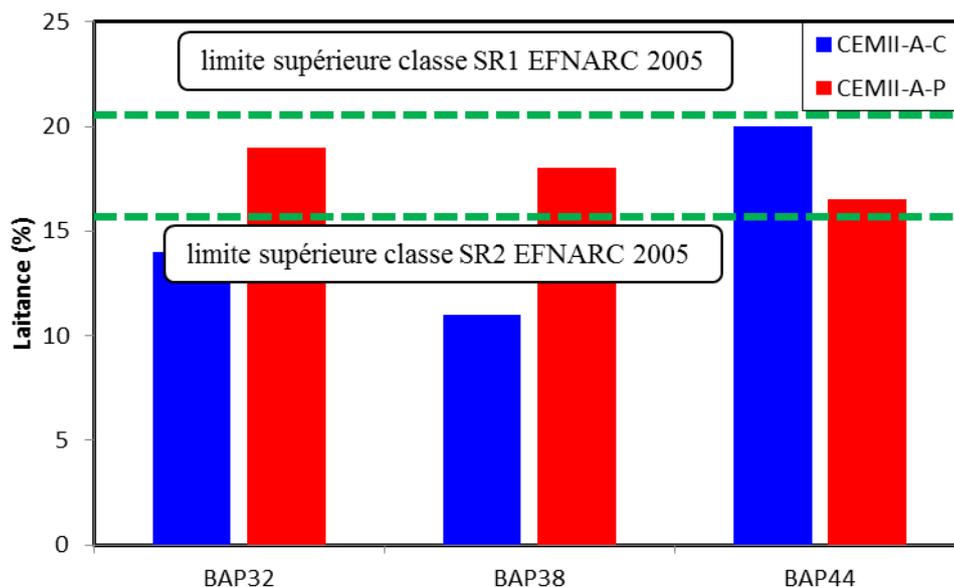


Figure 4.6: Pourcentage de laitance 15 mn après la fin de malaxage.

Selon l'EFNARC (2005) les mélanges BAP-C32 et BAP-C38 respecte la classe SR2 (laitance $\leq 15\%$), tandis que les autres BAP (BAP-C44, BAP-P32, BAP-P38 et BAP-P44) appartient à la classe SR1.

4.2.6 Corrélations entre les grandeurs de caractérisation de BAP

La Figure 4.7 montre la relation entre le temps V-Funnel (T_v) et le temps (T_{500}). Le coefficient de corrélation ($R^2 = 0.81$), indiquant une corrélation acceptable pour la relation $T_v = f(T_{500})$, une relation acceptable entre les temps T_{500} et T_v a été signalé pour des BAP contenant de la poudre de calcaire (Felekolu et al. 2007; Rahmat et al. 2012).

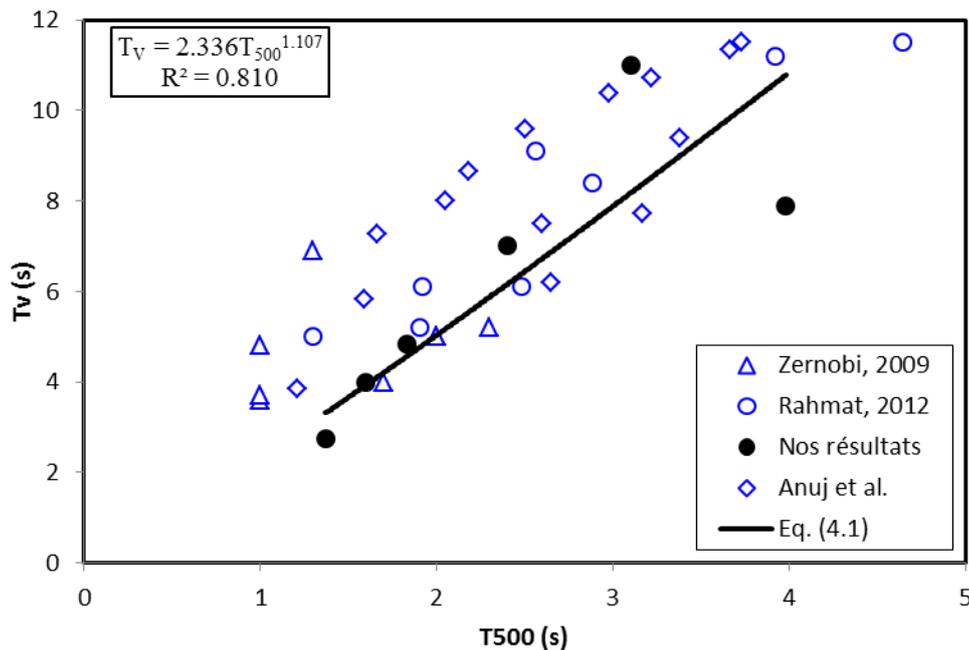


Figure 4.7: Relation entre T_v et le temps T_{500}

En outre, la Figure 4.7 montre que les résultats d'autres chercheurs (Zernobi 2009 ; Rahmat 2012 ; Anuj et al. 2015) sont proches de nos résultats. Cependant lorsque T_{500} augmente le temps T_v augmente ce qui est en accord avec les résultats d'Anuj et al. (2015).

Par contre, les résultats présentés dans la Figure 4.8 montrent qu'il n'existe pas une relation claire entre le temps (T_v) et l'étalement (d_{moy}). Cela montre que des BAPs avec un même étalement présentent des temps V-Funnel très différents. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs (Zerbino 2009; Rahmat 2012; Anuj et al. 2015; Nicolas 2012).

Selon l'ASTM C1621 le risque de blocage est estimé à travers la différence entre les étalements obtenue au cône, $d_{\text{moycône}}$ et au $d_{\text{J-Ring}}$. Ainsi un BAP ne présente pas des risques de blocage si : $d_{\text{moycône}} - d_{\text{J-Ring}} < 50\text{mm}$.

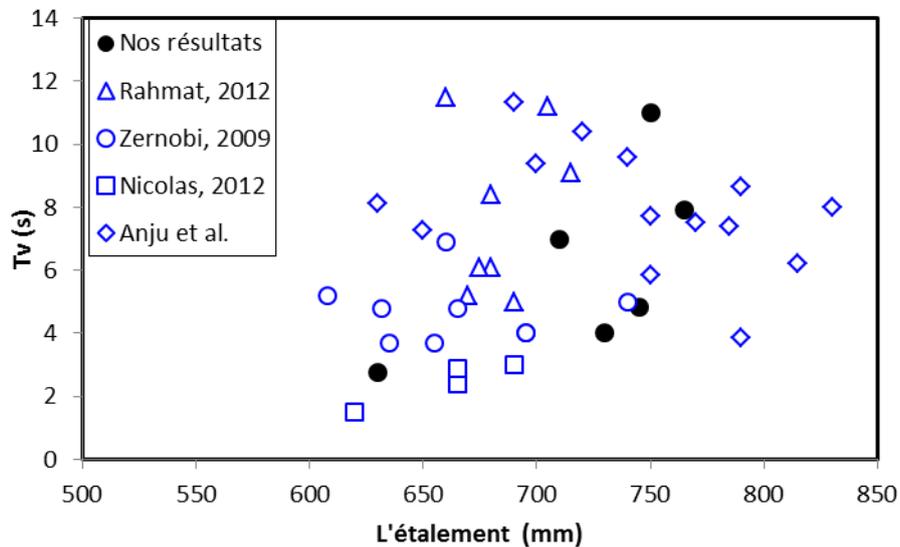


Figure 4.8: Relation entre l'étalement et le temps V-Funnel.

La Figure 4.9 présente la corrélation entre l'étalement obtenu au cône d'Abrams et celui obtenu par l'essai J-Ring pour les mélanges de BAP. Les résultats montrent que les BAPs à base de ciment au Pouzzolane (BAP-P32, BAP-P38, BAP-P44) présentent une différence négative entre le l'étalement au cône et en présence de J-Ring qui s'explique la situation des points au-dessous de la droite $y=x$ (qui caractérise l'égalité entre les deux étalements). Par contre les mélanges à base d'un ciment au calcaire (BAP-C32, BAP-C38, BAP-C44) présentent une différence positive mais reste toujours dans la fourchette exigé par l'ASTM C1621. En outre nous constatons une faible corrélation entre l'étalement au cône et l'étalement en présence de J-Ring ($R^2=0.697$). Il faut noter qu'aucun blocage n'a été observé au cours des essais.

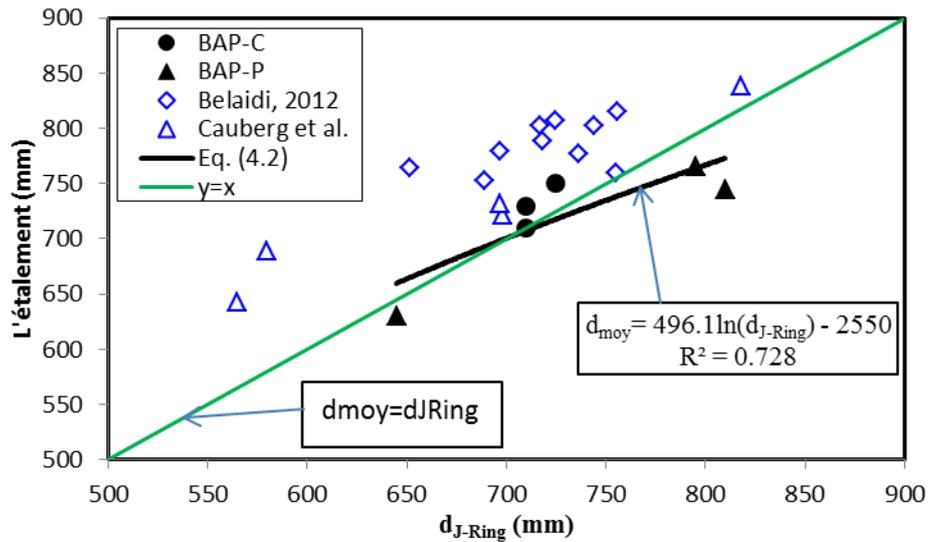


Figure 4.9: Corrélation entre l'étalement et l'écoulement dans le milieu confiné (J-Ring).

4.3 Fluidité des BAPs

4.3.1 Maintien de l'ouvrabilité (Slump Flow)

L'essai consiste à mesurer l'étalement au cône d'Abrams après des intervalles de temps de 15 minutes qui varient de T_0 qui correspond à la fin de malaxage à 45 minutes, la température à l'intérieur du laboratoire 36-40°C (période d'été). Afin de simuler le transport du BAP par temps chaud à des distances éloignées. Six BAPs formulés avec des dosages de superplastifiant qui varient en fonction du rapport E/L (voir [Tableau 3.8](#) Chapitre 3). Pendant le malaxage continué, le BAP est sujet aux deux phénomènes de vieillissement, phénomène irréversible dû à des réactions physico-chimiques entraînant l'augmentation de la viscosité.

Les effets combinés de la température et du temps de malaxage sur la perte de l'étalement des mélanges de béton autoplaçant incorporant différents ciments composés sont illustrés dans la [Figure 4.10](#). Cette dernière montre que la perte d'étalement augmente lorsque le temps de malaxage augmente.

Nous remarquons, également, qu'après 30 min pratiquement tous les BAPs perdent leurs caractères d'autoplaçance. De même il apparaît que la perte d'étalement est moins prononcée pour les BAPs confectionnés par un ciment CEMII-A-P. Cela peut être attribué à la grande surface spécifique Blaine du ciment CEMII-A-P par rapport à celle du ciment CEMII-A-C.

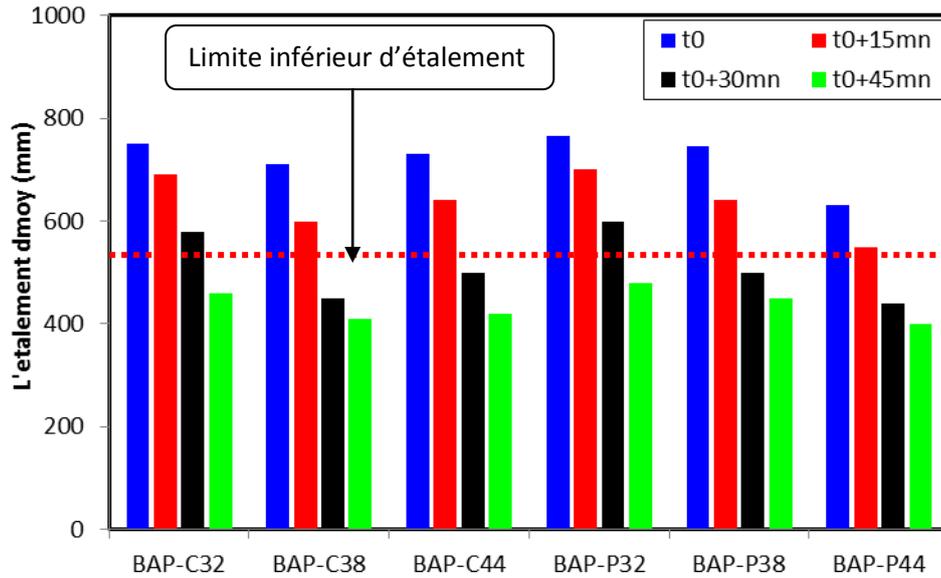


Figure 4.10: Evolution d'étalement (Slump Flow) en fonction du temps.

En outre, la perte d'étalement dépend grandement du dosage en SP et du rapport E/L, en diminuant le rapport E/L de 0.44 à 0.32 et en conservant la même fluidité par l'ajustement de la demande en SP, la perte d'étalement diminué. Ce qui est en accord avec les résultats obtenus par [Antoine \(2008\)](#).

4.3.2 Evolution du temps d'écoulement T500 en fonction du temps et par temps chaud

Les changements dans les propriétés de BAP à l'état frais pour les six mélanges à 40 °C sont montré dans la [Figure 4.11](#). Cette figure montre que tous les mélanges de BAP perdent leur propriété autoplaçance à partir de la mesure initiale après 15 minutes. La haute température du béton a entraîné un taux d'hydratation rapide qui peut entraîner une perte de maniabilité rapide.

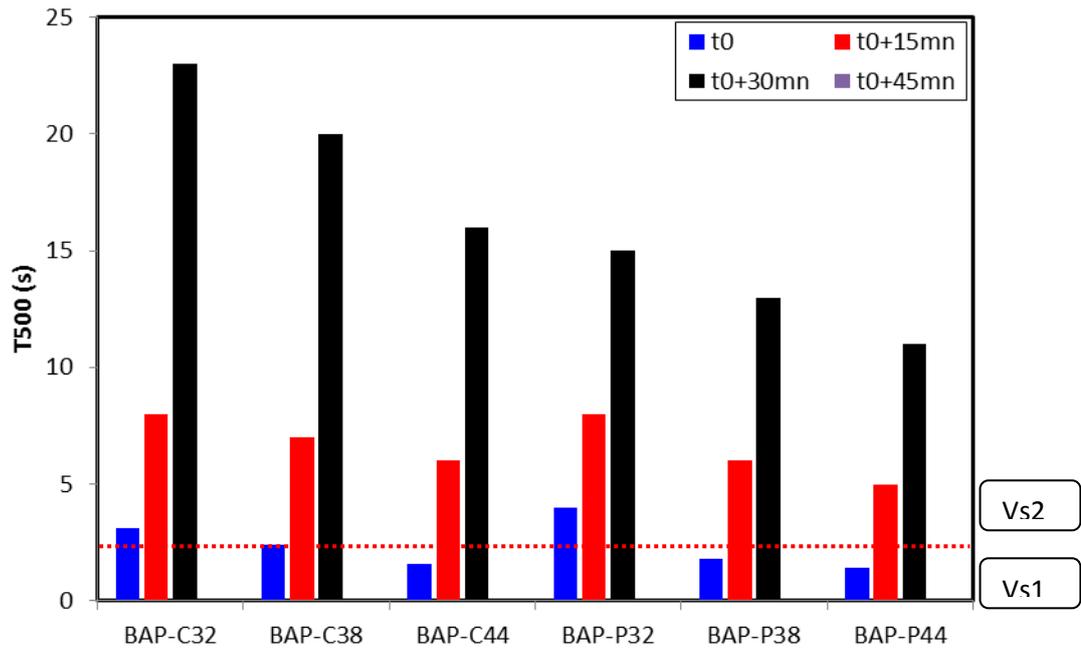


Figure 4.11: Evolution du temps d'écoulement T_{500} en fonction du temps.

À 45 minutes, nous n'avons pas d'enregistrement concernant le temps T_{500} , parce que l'étalement à 45 minutes est inférieur à 500mm, comme on le voit à la [Figure 4.12.b](#), donc l'étalement n'atteint pas les 500 mm afin d'enregistrer le T_{500} .

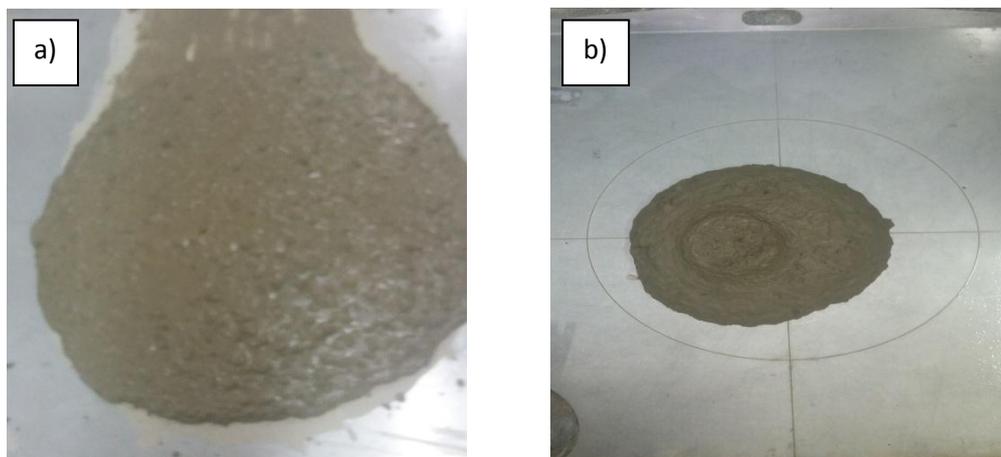


Figure 4.12: L'étalement à 40 °C, a) à la fin de malaxage et b) après 45 min.

4.3.3 Evolution du temps V-funnel par temps chaud

Les changements de la propriété d'écoulement V-Funnel à 36°C sont présentés dans la [Figure 4.13](#). Le temps V-Funnel augmente avec l'effet combiné du temps de malaxage et la température. En outre, le temps d'écoulement V-Funnel diminue avec l'augmentation du

rapport E/L est ceci quel que soit le temps de malaxage. Nous remarquons aussi dans la [Figure 4.13](#) que les temps V-Funnel sont dans les limites des recommandations [EFNARC\(2005\)](#) jusqu'à 15min à l'exception du mélange BAP-C32 qui dépasse légèrement la limite maximale selon l'[EFNARC \(2005\)](#). Cependant, le temps d'entonnoir en V dépasse la limite maximale à environ 30 minutes. En outre, le taux d'augmentation est plus prononcé on augmentant le rapport E/L.

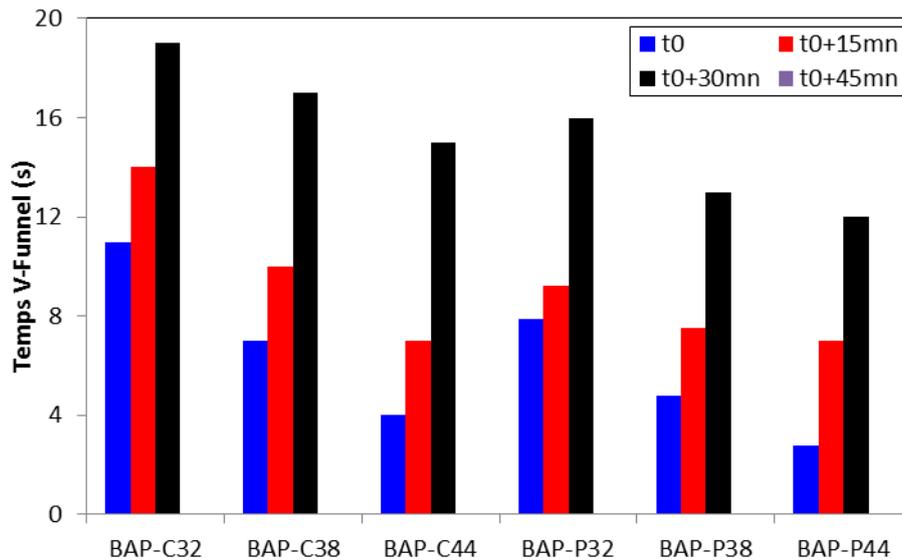


Figure 4.13: Evolution du temps V-Funnel à 40°C.

4.4 Etude de la rhéologie des BAPs utilisés

Tous les BAPs confectionnés satisfait les recommandations de l'[EFNARC \(2005\)](#), plusieurs chercheurs se sont intéressés de trouver des corrélations entre les grandeurs rhéologiques du BAP seuil de cisaillement et la viscosité plastique (τ_0, μ_p) et les grandeurs caractéristiques empiriques les plus utilisés ($T_{500}, d_{moy}, J-Rng, T_v, H_2/H_1...$). la plupart des chercheurs ont recours à au moins deux essais empiriques déférents pour trouver des relations entre grandeurs spécifiques et caractéristiques rhéologiques des BAPs. Cependant, plusieurs auteurs ont corrélié la viscosité plastique (μ_p) et le temps V-Funnel (T_v) tandis que le seuil de cisaillement dépend de l'étalement ([De Larrard et al.1999](#); [Jin1999](#)).

Dans l'absence du rhéomètre dans notre laboratoire on a recouru à des équations empiriques pour établir les paramètres rhéologiques des BAPs utilisés dans notre étude expérimentale pour mieux comprendre l'écoulement des mélanges de BAP.

Lorsque l'on effectue un essai d'étalement, on peut mesurer le temps T_{500} . Pour un même étalement final, plus le béton sera visqueux, plus il mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur T_{500} sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité de béton. [Kurokawa et al. \(1994\)](#) ont analysé l'affaissement d'un béton en fonction du temps par un modèle viscoplastique aux éléments finis. Ils ont tiré de leurs simulations une fonction permettant de calculer, à tout moment, l'affaissement à partir de la viscosité et de l'affaissement final du béton. Faisant l'hypothèse que l'échantillon de béton conserve, lors de l'affaissement, une forme de cône de diamètre inférieur double du diamètre supérieur, ils déduisent les équations 4.1 et 4.2 suivantes :

$$\mu_p = 125.3 \left(1 - \frac{4 \times 10^4}{SF^2}\right) \left(1 - \frac{25 \times 10^4}{SF^2}\right) \times T_{500} \quad (4.1)$$

$$\tau_0 = \frac{\rho_{BAP} \cdot g \cdot V_{\text{cône}}}{25\sqrt{3} \cdot \pi \cdot SF^2} \times 10^8 \quad (4.2)$$

Où:

ρ_{BAP} Masse volumique du BAP utilisé;

g : l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2);

$SF = d_{\text{moy}}$ (mm);

$V_{\text{cône}}$: volume du cône d'Abrams (m^3).

[Sédran \(1999\)](#) a proposé de nouvelles expressions reliant la viscosité plastique aux grandeurs spécifiques obtenues à partir de l'essai empirique le cône d'Abrams ([Eqs. 4.3 et 4.4](#)). Ces expressions ont été validées à partir d'un grand nombre d'essais empiriques réalisés sur différentes formulations de BAP caractérisés, également, au BetRheom,

$$\mu_p = \frac{\rho_{BAP}}{1000} \times (0.026 \times SF - 2.39) \times T_{500} \quad (4.3)$$

$$\tau_0 = (808 - SF) \frac{\rho_{BAP}}{1174} \quad (4.4)$$

D'après les résultants mentionnés dans le [Tableau 4.2](#) nous remarquons que le seuil de cisaillement (τ_0) des mélanges de BAP confectionné par un CEMII-A-C (ajout calcaire) est supérieur de celui des BAPs à base d'un ciment CEMII-A-P (ajout Pouzzolane) par application des équations de [Kurokawa et al. \(1994\)](#) à l'exception du mélange BAP-C44. D'après [El-Hilali \(2009\)](#) les filler calcaire augmente la compacité du squelette entraînant

une augmentation du seuil de cisaillement alors que le superplastifiant est un défloculant permettant une meilleure lubrification des surfaces solides conduisant à une baisse des frottements intergranulaires et par conséquent celle de (τ_0) . En outre, (τ_0) augmente avec l'augmentation du rapport E/L est ceci quel que soit le type de ciment à l'exception du mélange BAP-C44.

Tableau 4.2: Résultats des paramètres rhéologiques mesurés par les équations empiriques.

BAP	$\rho_{BAP}(\text{kg/m}^3)$	SF(mm)	$T_{500}(\text{s})$	$V_{\text{cone}}(\text{m}^3)$	Kurokawa (1994)		Sédran (1999)	
					$\mu_p(\text{Pa.s})$	$\tau_0(\text{Pa})$	$\mu_p(\text{Pa.s})$	$\tau_0(\text{Pa})$
BAP-C32	2375	750	3.1	0.0054977	200.45	167.68	117.33	125.97
BAP-C38	2327	710	2.4	0.0054977	139.55	183.32	194.25	89.75
BAP-C44	2223	730	1.6	0.0054977	98.44	165.67	147.70	59.01
BAP-P32	2338	765	3.98	0.0054977	266.13	158.65	85.63	162.83
BAP-P38	2371	745	1.83	0.0054977	116.93	169.64	127.23	73.67
BAP-P44	2346	630	1.37	0.0054977	57.13	234.79	355.77	44.97

Nous constatons, aussi, que les valeurs de (τ_0) mesurées par l'équation 4.4 proposée par [Sédran \(1999\)](#) sont sous-estimées par rapport à celles obtenues par l'équation 4.2 proposée par [Kurokawa et al. \(1994\)](#), ceci est dû probablement à la composition du mélange et le mode de malaxage.

La deuxième grandeur spécifique (μ_p) obtenue à partir de l'équation 4.1 ([Kurokawa et al. \(1994\)](#)) montre que la viscosité plastique diminue avec la diminution du rapport E/L. en outre, la viscosité du mélange BAP-C32 est inférieure à celle du mélange BAP-P32, tandis que, les valeurs des mélanges BAP-C38 et BAP-C44 sont supérieures à celles des BAP-P38 et BAP-P44. D'après [Hu \(1995\)](#) une viscosité inférieure à 200 Pa.s est favorable au pompage du béton ce qui est vérifié pour tous les BAP étudiés à l'exception du mélange BAP-P32.

Nous remarquons aussi une dispersion des résultats de la viscosité plastique calculée par les deux équations 4.1 et 4.3.

4.3.1 Corrélation entre grandeurs spécifiques expérimentales (τ_0 , μ_p) et caractéristiques rhéologiques des bétons

La Figure 4.14 représente la variation de la viscosité plastique (μ_p), estimée par les équations 4.1 et 4.3, en fonction du temps d'écoulement des BAPs confectionnés dans cette étude. D'autre part, la Figure 4.15 représente la variation du seuil de cisaillement (τ_0), estimé par les équations 4.2 et 4.4, en fonction du temps (T_v) mesuré expérimentalement.

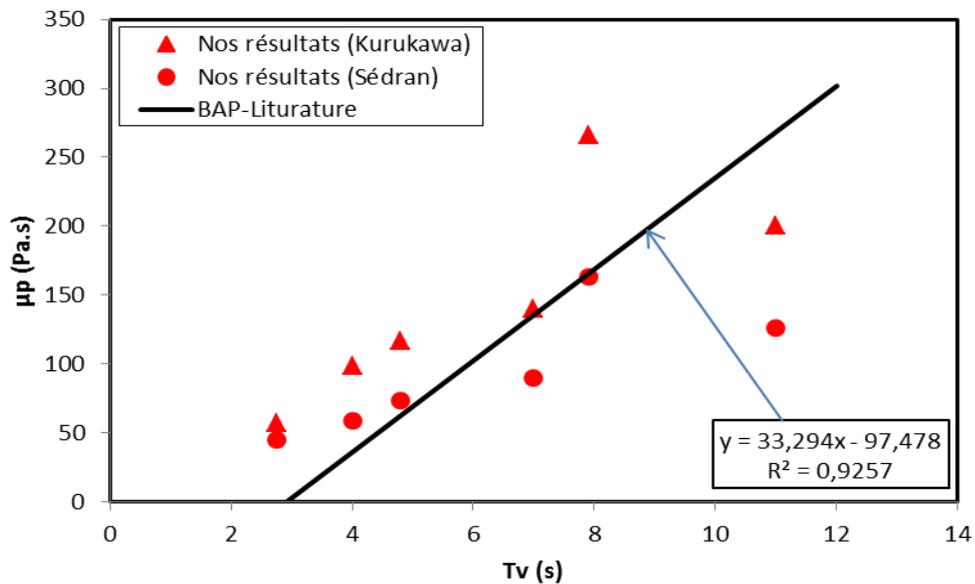


Figure 4.14: Corrélation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement T_v .

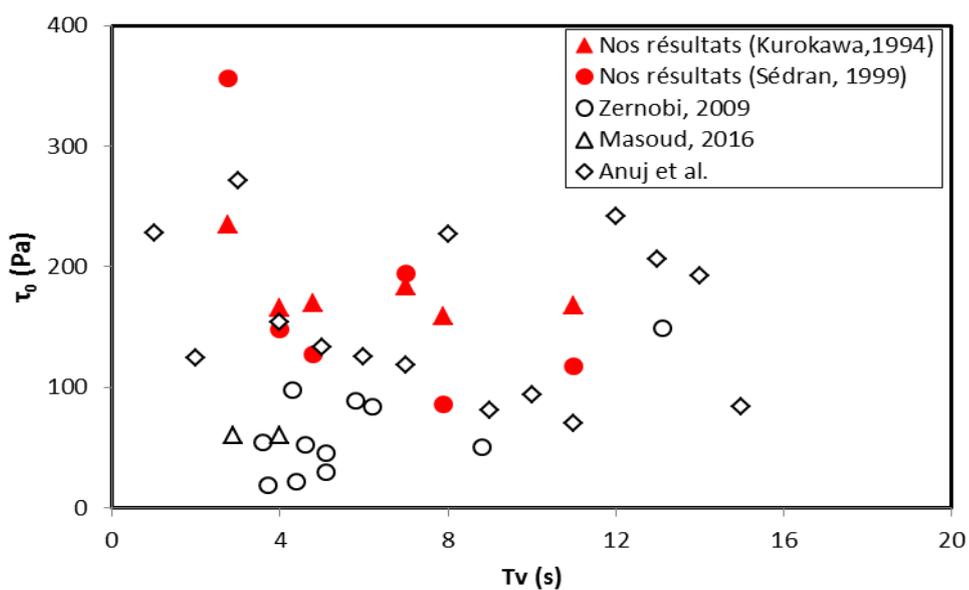


Figure 4. 15: Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement T_v .

Les résultats obtenus par l'utilisation des modèles disponibles dans la littérature ont été rassemblés dans le [Tableau 4.3](#). Ces résultats montrent qu'il existe une excellente corrélation linéaire entre viscosité plastique et le temps d'écoulement avec un coefficient de détermination $R^2=0.925$ (voir [Figure 4.14](#)). On constate, aussi, que nos résultats sont en concordance avec cette corrélation. Cependant, la viscosité plastique augmente lorsque le temps T_v augmente. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par [Aye \(2007\)](#).

Par contre, la [Figure 4.15](#) montre qu'il n'existe aucune corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps T_v pour les mesures rhéologique obtenus par les modèles disponibles dans la littérature ([Tableau 4.3](#)). En effet, nos résultats estimés par les équations 4.2 et 4.3 sont uniformément réparties par rapport aux mesures de la littérature.

Les [Figures 4.16](#) et [4.17](#) montrent les relations entre la viscosité plastique (μ_p) mesurée empiriquement et l'étalement mesuré expérimentalement (d_{moy}) d'une part, et le seuil de cisaillement (τ_0) mesuré empiriquement et l'étalement d'autre part. A partir des valeurs du [Tableau 4.3](#) on constate qu'il existe une bonne corrélation entre la viscosité plastique et l'étalement ($R^2=0.778$). Nous remarquons que nos résultats sont en accord avec les données de cette corrélation.

Tableau 4.3: Valeurs des grandeurs rhéologique de la littérature.

Masoud 2016	$\mu_p(\text{Pa.s})$	40	30	20	/	/	/	/	/
	$T_v(\text{s})$	2.0	2.9	4.0	/	/	/	/	/
	$\tau_0(\text{Pa})$	60	60	60	/	/	/	/	/
	$d_{moy}(\text{mm})$	700	700	700	/	/	/	/	/
	$T500(\text{s})$	/	/	/	/	/	/	/	/
Zernobi 2009	$\mu_p(\text{Pa.s})$	24	34	35	47	33	49	34	63
	$T_v(\text{s})$	3.7	4.4	5.1	6.2	4.0	5.2	4.6	5.1
	$\tau_0(\text{Pa})$	19	22	45	84	52	30	54	98
	$d_{moy}(\text{mm})$	635	580	555	440	695	608	540	575
	$T500(\text{s})$	1.0	1.0	2.0	1.0	1.3	1.3	2.5	2.0
Abdellah 2009	$\mu_p(\text{Pa.s})$	275	261	264	278	279	281	289	/
	$T_v(\text{s})$	11	12	10	10	11	10	12	/
	$\tau_0(\text{Pa})$	113.7	96.8	96.8	108.5	110.3	110.2	130.4	113.5
	$d_{moy}(\text{mm})$	660	670	670	660	656	670	650	660
	$T500(\text{s})$	4.04	4.08	4.12	4.17	4.15	4.19	4.23	4.25
Sédran 1999	$\mu_p(\text{Pa.s})$	163	189	315	304	166	58	138	126
	$T_v(\text{s})$	/	/	/	/	/	/	/	/
	$\tau_0(\text{Pa})$	308	224	265	445	336	210	385	180

	d _{moy} (mm)	745	785	745	555	705	700	670	670
	T500(s)	4.4	3.9	4.9	10.9	4.5	4.4	5.5	4.8
Anuj et al.	μ _p (Pa.s)	/	/	/	/	/	/	/	/
	Tv(s)	7.3	5.8	3.8	11.3	10.4	9.6	8.7	8
	τ ₀ (Pa)	228	124	271	154	133	125	118	227
	d _{moy} (mm)	650	750	790	690	720	740	790	830
	T500(s)	1.7	1.6	1.2	3.7	3.0	2.5	2.2	2.1
Aisoun et al.2016	μ _p (Pa.s)	25	33	38	54	51	45	36	45
	Tv(s)	/	/	/	/	/	/	/	/
	τ ₀ (Pa)	96	88	111	71	72	59	43	41
	d _{moy} (mm)	515	570	550	550	615	645	650	665
	T500(s)	2.3	2.0	2.3	3.6	3.2	2.8	2.3	3.5

En outre, la [Figure 4.17](#) montre la corrélation entre l'étalement (d_{moy}) mesuré expérimentalement juste après la fin de malaxage et le seuil de cisaillement (τ₀) mesuré par les expressions empiriques données par [Kurokawa et al. \(1994\)](#) et [Sédran \(1999\)](#). Les données du [Tableau 4.2](#) montrent qu'il existe une bonne corrélation linéaire entre τ₀ et d_{moy} ([Eq. 4.7](#)) avec un coefficient de détermination R²=0.75

$$\tau_0 = -1.282d_{moy} + 1100 \tag{4.7}$$

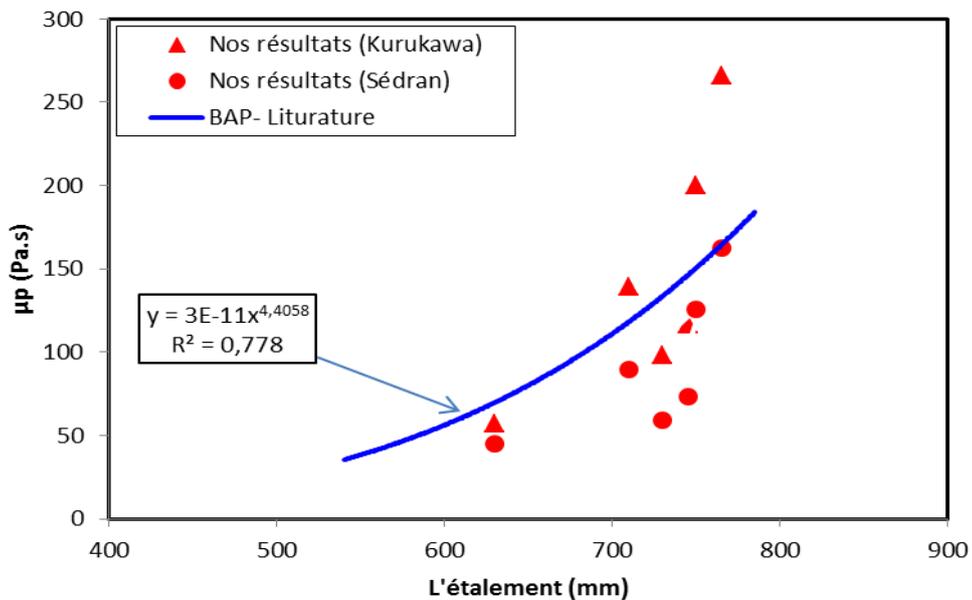


Figure 4. 16: Corrélation entre la viscosité plastique et l'étalement.

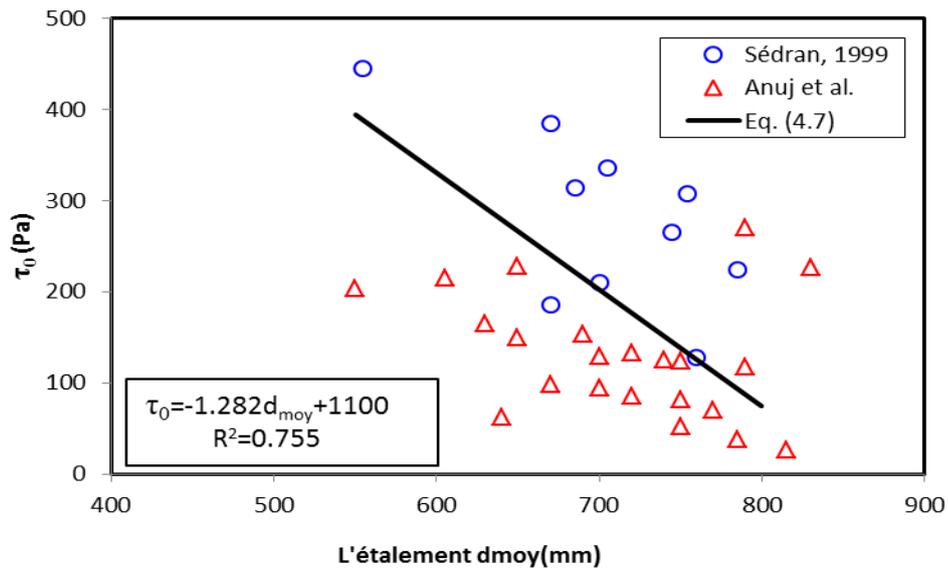


Figure 4.17: Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement.

En outre, en augmentant la valeur d'étalement, le seuil de cisaillement diminue, ceci est en accord avec les constatations de [Tattersall et Banfill \(1983\)](#). Ces chercheurs ont été les premiers à signaler qu'il existe une relation linéaire entre le seuil de cisaillement et l'étalement. Certaines équations rapportées dans la littérature sont basées sur des simulations par les éléments finis sur les tests d'étalement au cône ([Hu et al. 1996](#); [Kurokawa et al. 1994](#)), tandis que d'autres sont basées sur l'ajustement des bases de données ([Ferraris et al. 1998](#); [Sedran 1999](#)).

D'autre part, la [Figure 4.18](#) montre la relation entre la viscosité plastique (Eqs. 4.1 et 4.3) et le temps T_{500} (expérimentale). On constate qu'il existe une bonne corrélation exponentielle entre la viscosité et le temps T_{500} avec un coefficient de détermination $R^2=0.845$. En plus, nos résultats sont assez proches de cette courbe de tendance.

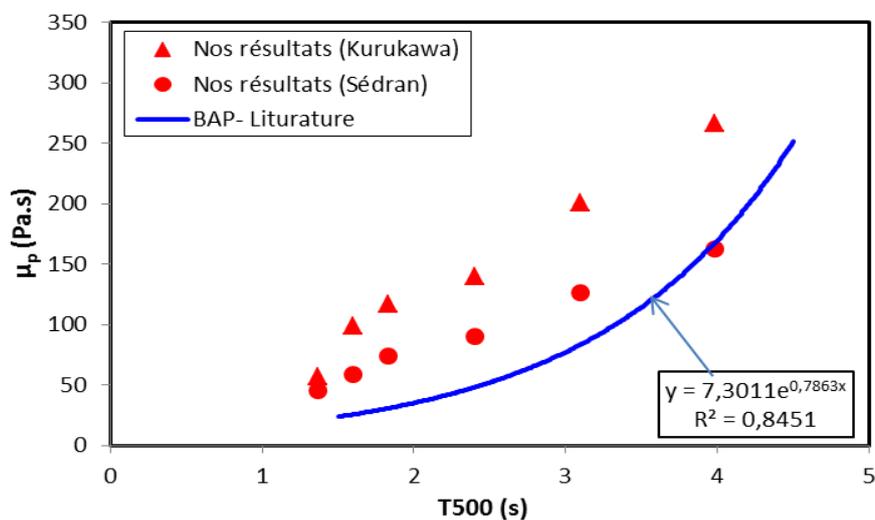


Figure 4.18: Corrélation entre la viscosité plastique et le temps T_{500} .

Par contre, la [Figure 4.19](#) représente la variation du seuil de cisaillement (Eqs. 4.2 et 4.4) en fonction de T_{500} . On constate qu'il n'existe aucune corrélation claire entre le seuil de cisaillement et le temps T_{500} .

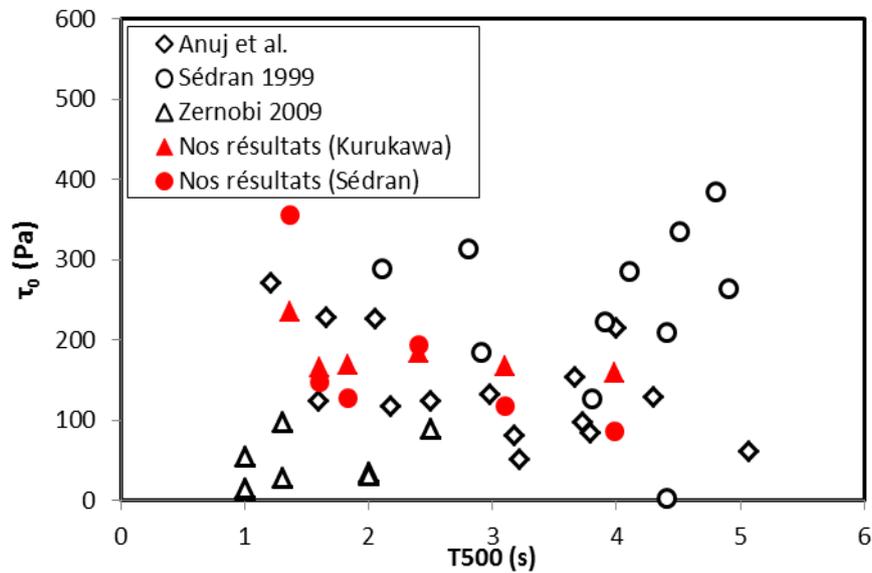


Figure 4.19: Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps T_{500}

En fin, la [Figure 4.20](#) montre la dispersion des couples (seuil de cisaillement τ_0 et viscosité plastique μ_p) des données des BAPs de la littérature ([Tableau 4.3](#)). On constate, aussi, que nos résultats appartiennent au nuage de points de la littérature.

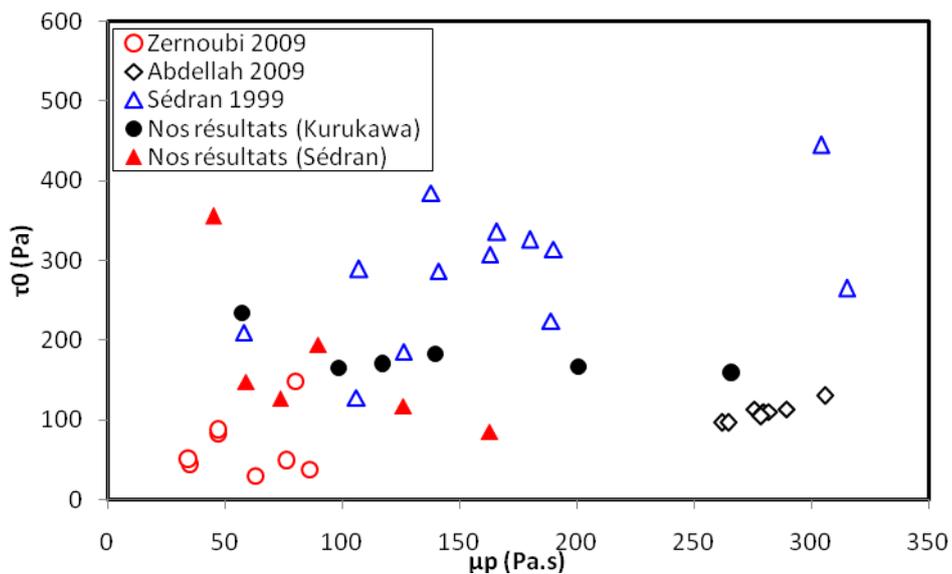


Figure 4.20: Corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

4.4 Conclusion

L'étude de la rhéologie des bétons est généralement utilisée pour établir les propriétés fondamentales d'un matériau, entre autres, ses paramètres intrinsèques. D'autre part, les recherches sur les bétons à l'état frais est relativement récente. De nombreux chercheurs ont montré que les résultats des tests empiriques étaient fortement liés à la rhéologie concrète du béton frais.

L'étude rhéologique du béton frais, plus particulièrement du béton autoplaçant est d'une grande importance, et indispensable pour améliorer plusieurs points tels qu'un mode opératoire adéquate pour la réalisation des essais rhéologiques, et l'utilisation de modèles représentatifs pour suivre l'évolution des grandeurs rhéologiques.

Cependant, les recherches sur les bétons frais sont loin d'être achevées car tous les types de bétons ont un comportement différent en fonction de leur composition et de la méthode de malaxage. Ainsi, ce chapitre nous renseigne sur les approches de caractérisation et surtout le maintien de l'ouvrabilité par temps chaud, cette dernière qui est une caractéristique importante pour les BAP à l'été frais.

Les résultats obtenus lors de l'étude expérimentale sur les BAP à l'état frais amènent les conclusions suivantes :

- On remarque une perte d'étalement pour les six BAPs. D'autre part, Nous remarquons, également, qu'après 30 min pratiquement tous les BAP perdent leur caractère d'autoplaçance. De même il apparait que la perte d'étalement est moins prononcé pour les BAPs confectionnés par un ciment CEMII-A-P. Cela peut être attribué à la grande surface spécifique Blaine du ciment CEMII-A-P en comparaison avec le ciment CEMII-A-C.
- À 45 minutes, nous n'avons pas d'enregistrement concernant le temps T_{500} , parce que l'étalement à 45 minutes est inférieur à 500mm.
- Le temps V-Funnel augmente avec l'effet combiné du temps de malaxage et la température. En outre, le temps d'écoulement V-Funnel diminué avec l'augmentation du rapport E/L est ceci quel que soit le temps de malaxage.
- Ils existent de très bonnes corrélations entre les grandeurs de caractérisation de BAP et les grandeurs rhéologiques mesurées (seuil de cisaillement et viscosité plastique).

Chapitre 5:

RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié l'autoplacance des bétons malaxés à température estivale. Ainsi que le maintien de l'autoplacance et l'étude de la rhéologie des BAPs confectionnés à base des matériaux locaux par des modèles empiriques.

Dans ce chapitre, nous présenterons les effets du climat chaud et de la période initiale de cure humide sur la résistance à la compression des BAPs à 3, 7, 28 et 90 jours ainsi que sur les mesures non destructives (vitesse ultrasonique et indice de rebondissement). Enfin, les résultats des modules d'élasticité dynamique, des BAPs étudiés, à 28 jours et 90 jours seront présentés et discutés.

5.2 Effets de la période de cure initiale sur la résistance en compression des BAPs

Les mesures ont été effectuées sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté. Les [Tableaux 5.1](#) et [5.2](#) récapitulent les valeurs moyennes des résistances en compression des bétons aux différents âges. Les [Figures 5.1](#) et [5.2](#) montrent l'évolution de la résistance en compression des BAPs, confectionné par les ciments CEMI-A-C (ajout calcaire) et CEMII-A-P (ajout Pouzzolane) respectivement, avec la durée de cure humide initiale. Il est clairement constaté que les méthodes de cure jouent un rôle très important dans le développement de la résistance en compression. La résistance en compression des BAPs conservés dans l'eau est plus élevée que celle des bétons exposés au climat chaud à tous les âges, quelque soit le rapport E/L et le type de liant. En outre, la durée de cure humide initiale contribue également au développement de la résistance à la compression. Les [Figures 5.1](#) et [5.2](#) montrent que la durée de cure humide initiale optimale, pour développer de meilleures résistances à la compression, est de 7 jours en comparaison avec les autres modes de cure. Il est à noter que le même résultat a été obtenu par [Zhao et al. \(2012\)](#).

Les BAPs confectionnés avec un rapport E/L de 0,44 et conservés dans un climat chaud ont développé de faibles résistances en compression [Fig. 5.1 \(c\)](#). Cependant, après une cure humide initial de 7 jours dans l'eau puis continué dans le climat chaud, le BAP avec un rapport E/L de 0,32 a développé des résistances à la compression maximales. Pour une période de durcissement plus longue, une augmentation supplémentaire de la résistance à la compression des mélanges de BAP a été enregistrée lorsque le rapport E /L de 0,32 a été adopté. Il convient de noter que dans tous les cas, la résistance à la compression augmente

avec la période de durcissement. En outre, la résistance à la compression diminue lorsque le rapport E/L augmente.

Tableau 5.1: Valeurs de la résistance à la compression en (MPa) du ciment (CEMII-A-C).

E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	58	58.8	68.6	70	44.5	49.8	52.5	61.2	32.8	39.8	42	44
E3		64.2	66	68		52.5	54	58		40.3	42	43
E7			71.8	74			60	64			44	45
E14			70.8	72.3			58.8	62.8			40.5	43.5
CC	42.5	47.2	55.5	60.7	42.2	43.2	44.5	51.3	31.8	35.3	36.5	37.8

Tableau 5.2: Valeurs de la résistance à la compression en (MPa) du ciment (CEMII-A-P).

E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	52.7	64	71.3	72.3	48.2	52	54	64	41.8	47	50	52
E3		65.5	69	70		53	54	57		45	46	47.8
E7			73	74.3			56	64			48	53
E14			70.2	71			55.8	63			50	51.5
CC	47.9	50.2	55.2	59.2	43	45	47.2	48.7	38	40.3	41.8	44.5

Pour un rapport E/L de 0,32, les valeurs de la résistance à la compression des BAPs durcies dans un climat chaud (CC) étaient très faibles par rapport aux éprouvettes durcies dans l'eau pour tous les périodes de cure humide initiale.

Selon [Guo \(1989\)](#), l'influence de la température sur le développement de la résistance est réduite avec l'âge. La résistance du béton avec la même proportion de mélange et les matériaux dépend de leur histoire thermique. Les bétons durcis à des températures plus élevées ont une résistance à jeune âge plus élevée mais une faible résistance finale.

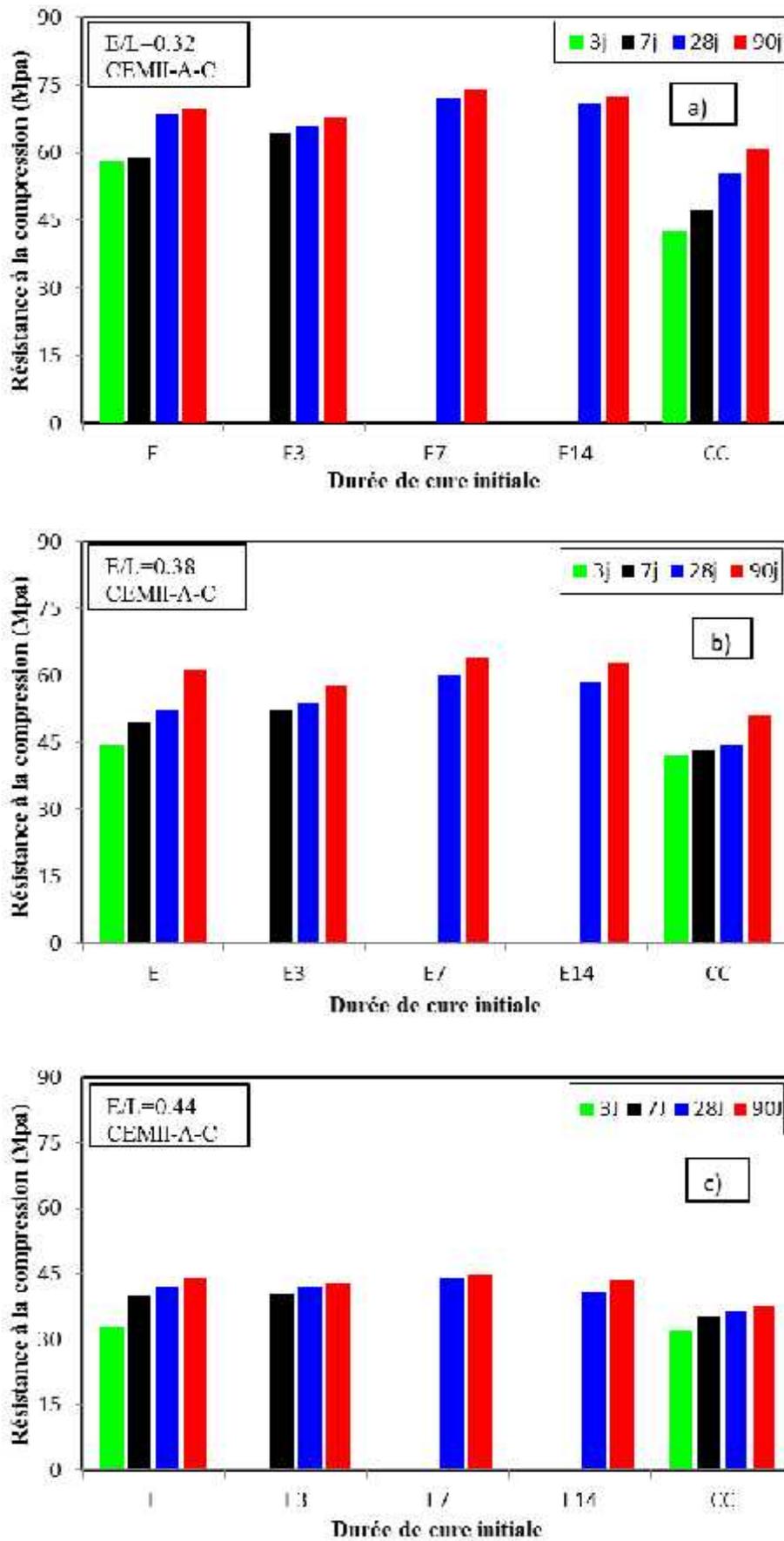


Figure 5.1: Résistance à la compression des BAPs en fonction de la durée de cure humide initiale.

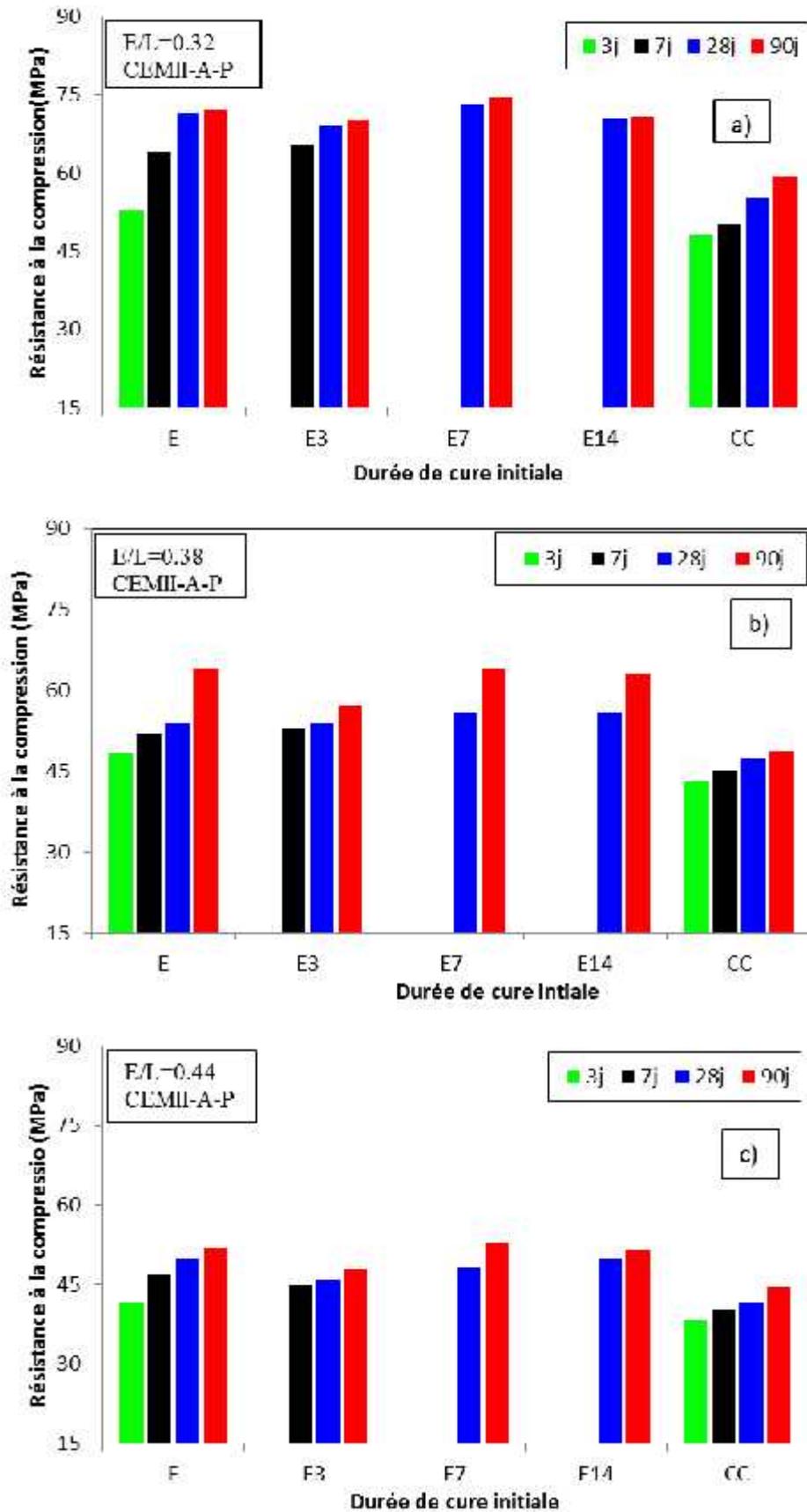


Figure 5.2: Résistance à la compression des BAPs en fonction de la durée de cure initiale

L'augmentation de la résistance au jeune âge est due au taux plus élevé d'hydratation du ciment. La diminution du taux de gain de résistance à un âge ultérieur est due à l'hydratation liée à la diffusion (Kjellsen et al. 1991). L'hydratation rapide causée par des températures élevées produit plus de produits, qui n'ont pas le temps de diffuser suffisamment loin du point de réaction. Les produits empêchent d'autres réactions. La distribution non uniforme des produits d'hydratation nouvellement formés provoque des zones faibles dans la matrice cimentaire qui réduit par conséquent la résistance.

Selon Al Amri (1988), les températures de durcissement élevées entraînent des produits d'hydratation faibles et mals dispersés et des résistances plus faibles en raison du taux d'évaporation plus élevé nécessaire à l'hydratation.

L'humidité relative est un autre facteur de durcissement qui affecte le développement de la résistance. L'hydratation du ciment s'arrête si l'humidité relative interne est inférieure à 80% en raison de l'évaporation ou l'auto-dessiccation, et par conséquent, le gain de résistance s'arrête (Mindess et Young 1981).

Pour une plus longue période de séchage, l'effet destructeur de la température initiale élevée sur la résistance peut être attribué au taux d'hydratation rapide car la pâte de ciment devient poreuse et l'apparition des microfissures à partir de l'interface entre l'agrégat et le mortier peuvent affecter négativement la structure des pores et la résistance à long terme (Nasir et al. 2016). Cependant, la différence de valeurs de la résistance en compression est marginale lorsque le rapport E/L augmente. Avec un rapport E/L de 0,32, l'augmentation de la résistance à la compression avec le temps est très marquée avec les spécimens du BAP conservés dans l'eau et ceux conservés dans un CC pendant des durées de cure humide initiale de 3, 7 et 14 jours. Ce comportement a été constaté pour tous les rapports E/L sauf pour les spécimens du BAP avec un rapport E/L = 0,44 conservé en CC.

Il est tout à fait clair d'observer que la résistance à la compression de tous les BAPs partiellement durcis dans l'eau augmente de 3 à 7 jours et après cette durée de durcissement devienne constante. En outre, les résultats ont montré que le climat chaud de la région de Chlef (température ambiante est élevée et humidité relative faible pendant les mois d'été, comme le montre les Figures 5.3 et 5.4), a considérablement diminué la résistance des BAPs par rapport aux BAPs complètement ou partiellement immergés dans l'eau et ceci pour tous les rapports E/L étudiés.

Ce comportement s'explique par l'évaporation excessive due à la nature semi-aride du climat chaud de la région de Chlef. Ceci est en accord avec les travaux de [Bushlaibi et Alshamsi \(2002\)](#). Cependant, en dehors du mode de durcissement dans le climat chaud, les spécimens maintenus à 7 et 14 jours dans l'eau, puis conservés dans le climat chaud ont une résistance à la compression supérieure par rapport aux spécimens qui ont été immergés dans l'eau jusqu'à 90 jours. Cela peut être attribué à la différence d'humidité relative. L'élimination de l'humidité de la couche intermédiaire du gel de ciment réduirait la pression de disjonction et augmenterait les forces de liaison entre les particules de produits d'hydratation ([Mindess 1983](#)) et donc la résistance à la compression du BAP.

D'après [Mouret \(2007\)](#) l'utilisation de filler calcaire permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10%. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier ([Lawrence 2000](#)). Cette influence positive du filler calcaire sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice cimentaire du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats ([Boziljkov 2003](#)). D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation ([Ye 2007](#)) mais également en modifiant les produits d'hydratation formés ([Kakali 2000](#)). Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) ([Escadeillas 1988](#)) et a tendance à être négligeable à long terme ([Zhu 2004](#)). Les [Figures 5.1](#) et [5.2](#) montrent que les mélanges de BAP avec le rapport $E/L=0.44$ développe des résistances à la compression minimales quel que soit le type de liant. Alors que lorsque le rapport E/L ou E/C augmente, le volume de pores capillaires augmente en raison de l'évaporation de l'eau de mélange. Cela augmente la porosité et, par conséquent, la résistance à la compression diminue. En outre, comme mentionné précédemment, le temps chaud a des effets négatifs sur la résistance à la compression du béton ([ACI 305R 2010](#)). Il peut augmenter la température du béton et le taux d'hydratation à un âge précoce. Le comportement précoce du béton rend difficile la mise en place et le compactage du béton.

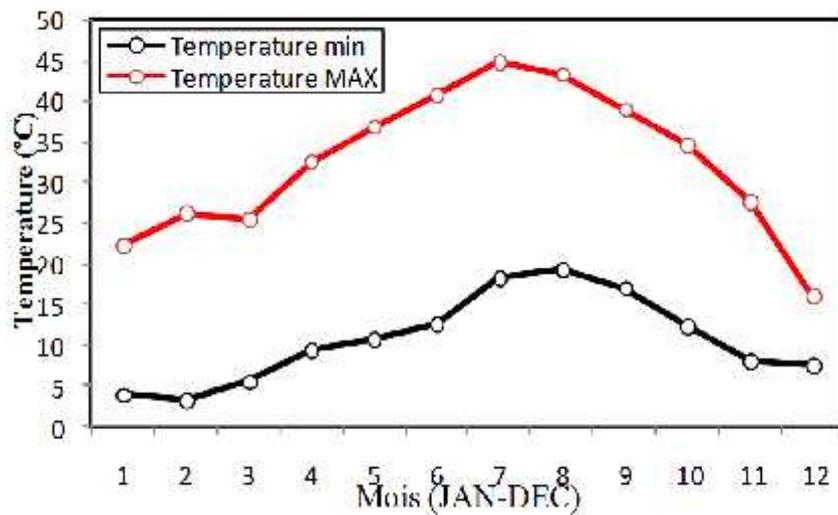


Figure 5.3: Température moyenne max et min de la région de Chlef (Météo Chlef 2014)

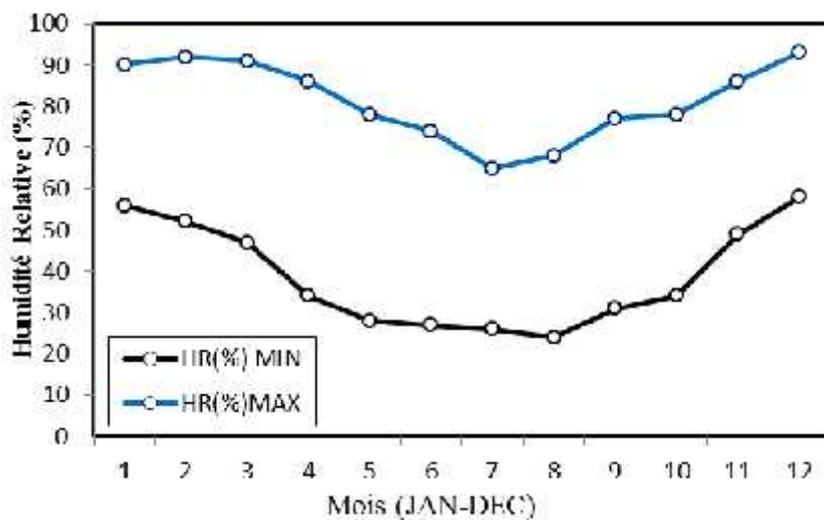


Figure 5.4: Humidité relative max et min de la région de Chlef (Météo Chlef 2014).

La Figure 5.2 montre l'évolution de la résistance à la compression des mélanges de BAP confectionnés par le ciment CEMII-A-P (ajout Pouzzolane naturelle). La résistance à la compression évolue avec l'âge. L'effet favorable de la pouzzolane naturelle au cours de la réaction pouzzolanique a été aussi constaté à partir de 28 jours d'âge. Ainsi, la résistance à la compression a été largement améliorée suite à la production des C-S-H supplémentaires qui rendent la microstructure des BAP-P plus dense et diminuent leurs porosités capillaires (Ayache 1996). En outre, la résistance à la compression des éprouvettes de BAP-P est légèrement supérieure à celle des éprouvettes de BAP-C. Ceci est probablement dû à la réaction Pouzzolanique.

Pour mieux clarifier les résultats de la résistance à la compression on a tracé ces résultats sous forme de courbe Figures 5.5 et 5.6. Il est clair que pour une durée de cure initiale de 7 jours la résistance en compression est optimale est ceci quelque soit le rapport E/L et le type de liant.

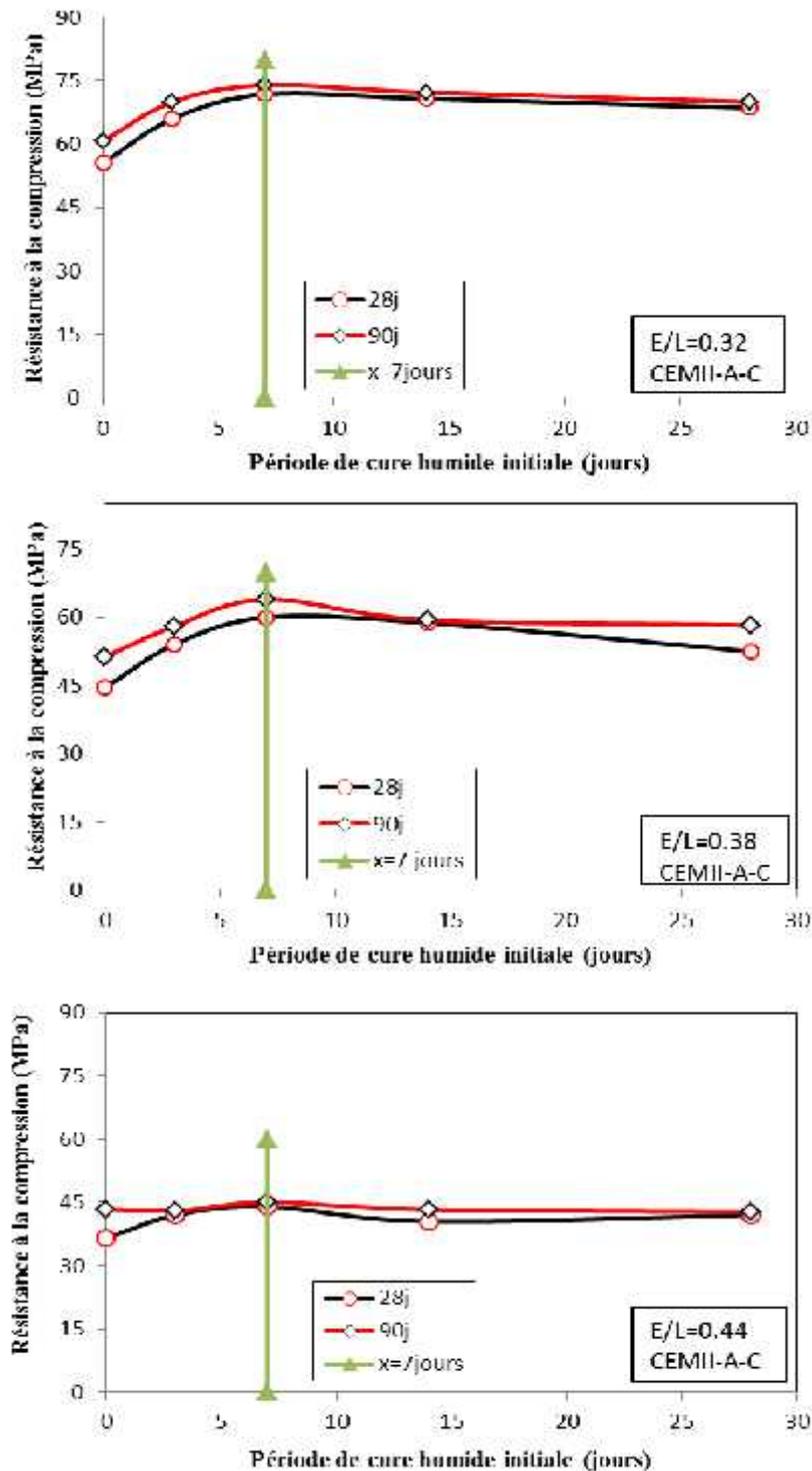


Figure 5.5: La résistance à la compression optimale en fonction de la durée de cure initiale.

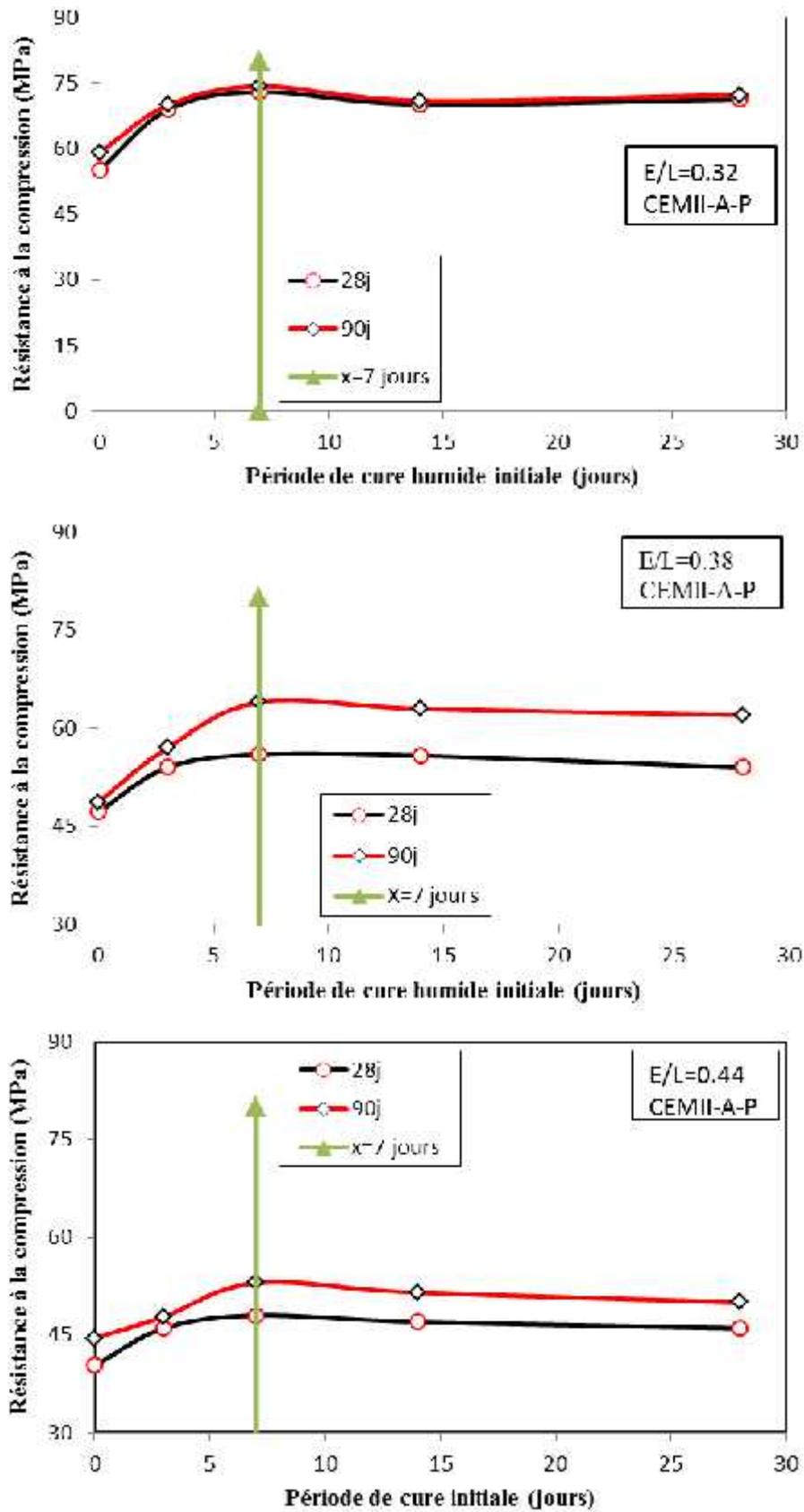


Figure 5.6: La résistance à la compression optimale en fonction de la durée de cure initiale.

5.3 Essais non destructifs CND pour différentes BAPs en fonction de la période de cure humide

Dans ce paragraphe l'objectif est d'établir les relations empiriques possibles entre la résistance du BAP et les mesures non destructifs (CND) et d'analyser la qualité de corrélation en prenant comme indicateur statistique le coefficient de détermination « R^2 » qui détermine l'adéquation du modèle de régression pour décrire la distribution des données mesurées. Dans la pratique de l'ingénierie et dans la littérature scientifique, les travaux ont visé généralement l'établissement des lois de corrélation et l'analyse des modèles établis. Pour une estimation non destructive de la résistance du béton, les techniques du Rebond et de l'UPV sont choisies séparément pour établir les relations entre les résistances et les mesures CND. Pour chaque technique, le modèle décrivant cette relation est testé sous trois formes mathématiques différentes qui sont les plus utilisées dans la littérature: forme linéaire, puissance et exponentielle. Dans le cas de comparaison de modèles entre les différents cas d'essai, on s'est limité sur le modèle puissance pour le Rebond et le modèle exponentiel pour l'UPV.

5.3.1 Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV)

Les résultats d'essai de résistance (sur cube) sont croisés contre les résultats de CND (UPV) correspondants pour cinq modes de cure ([Tableau 3.8 chapitre 3](#)), cas d'essai complètement conservées dans l'eau, cas d'éprouvettes partiellement conservées dans l'eau (3 durée de cure humide initiale de 3, 7 et 14 jours) et cas d'éprouvettes exposées au climat chaud réel (CC) qui sont testés à différents âges 3, 7, 28 et 90 jours ([Figures 5.7 et 5.8](#)).

Le test de vitesse d'impulsion est une technique non destructive qui permet d'évaluer l'homogénéité du béton. La vitesse de l'impulsion dans un solide dépend essentiellement des propriétés élastiques et de la densité du matériau. Les [Tableaux 5.3 et 5.4](#) présentent les valeurs de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) sur des échantillons de BAPs. L'augmentation de l'UPV avec l'âge a été observée pour tous les échantillons de BAP. En outre, les valeurs d'UPV des spécimens de BAP guéris dans un climat chaud étaient inférieures à celles traitées dans d'autres modes de durcissement. La diminution de l'UPV des spécimens de BAP guéris dans le CC peut s'expliquer par la formation de microfissures (probablement en raison de la contraction accrue du retrait et des mouvements thermiques différentiels des constituants de BAP) et de la réduction de la teneur en humidité de l'échantillon ([Almusallam 2001](#)).

Tableau 5.3: Valeurs de l'UPV des BAP (CEMII-A-C).

Vitesse ultrasonique (UPV) en km/s												
E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	4.440	4.450	4.500	4.510	4.380	4.400	4.400	4.420	4.050	4.140	4.160	4.230
E3		4.470	4.480	4.490		4.380	4.400	4.420		4.100	4.170	4.190
E7			4.530	4.590			4.470	4.490			4.190	4.200
E14			4.520	4.550			4.520	4.550			4.140	4.150
CC	4.170	4.240	4.270	4.390	4.240	4.270	4.270	4.390	4.030	4.080	4.100	4.110

Tableau 5.4: Valeurs de l'UPV des BAP (CEMII-A-P).

Vitesse ultrasonique (UPV) en km/s												
E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	4.462	4.465	4.592	4.610	4.237	4.320	4.475	4.511	4.147	4.250	4.256	4.280
E3		4.546	4.588	4.589		4.318	4.338	4.344		4.057	4.185	4.283
E7			4.494	4.605			4.323	4.368			4.090	4.292
E14			4.435	4.495			4.372	4.419			4.127	4.280
CC	4.278	4.285	4.295	4.396	4.170	4.202	4.217	4.326	3.938	3.975	4.094	4.136

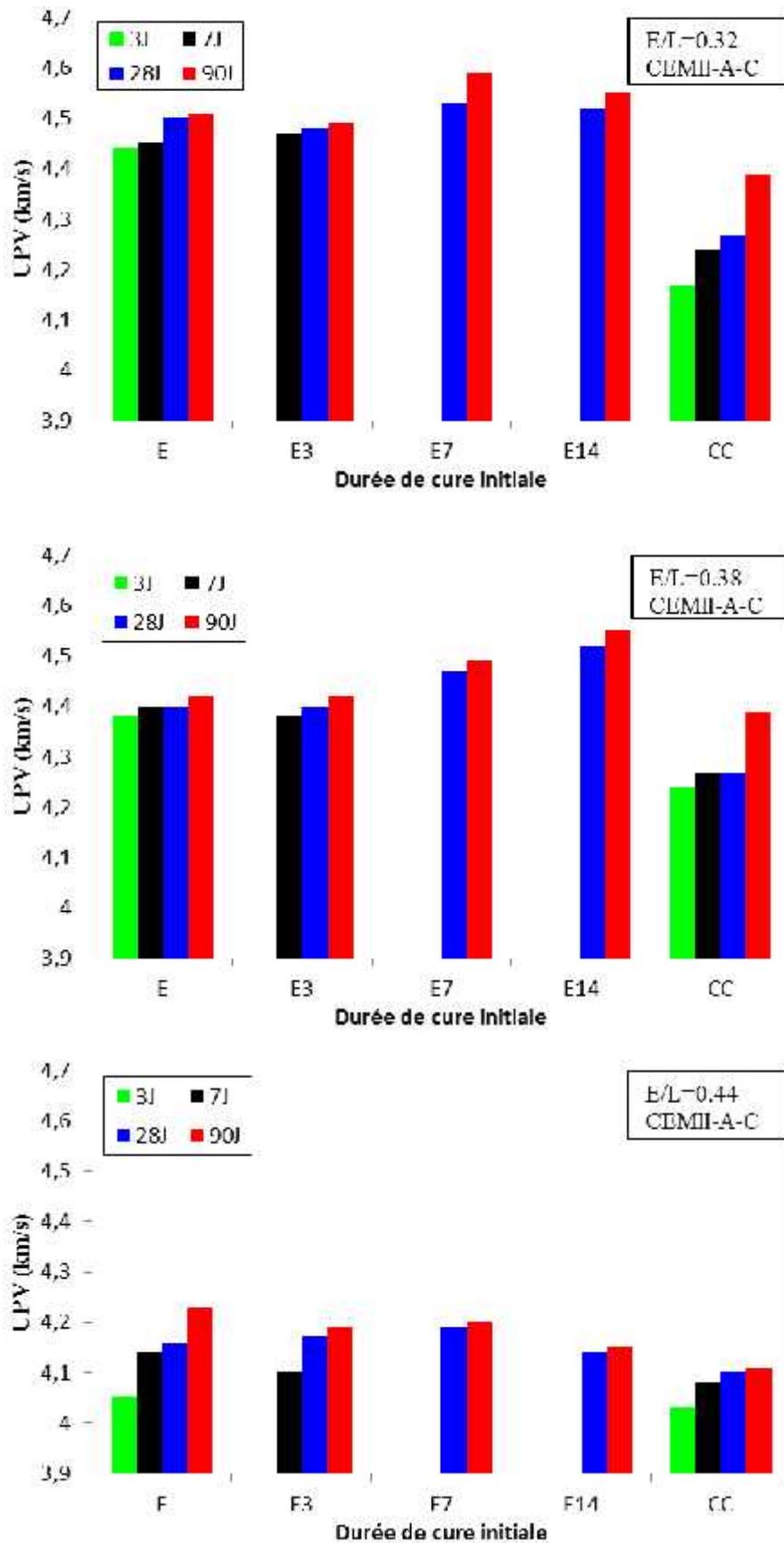


Figure 5.7: Vitesse ultrasonore en fonction du temps et la durée de cure initiale (CEMII-A-C).

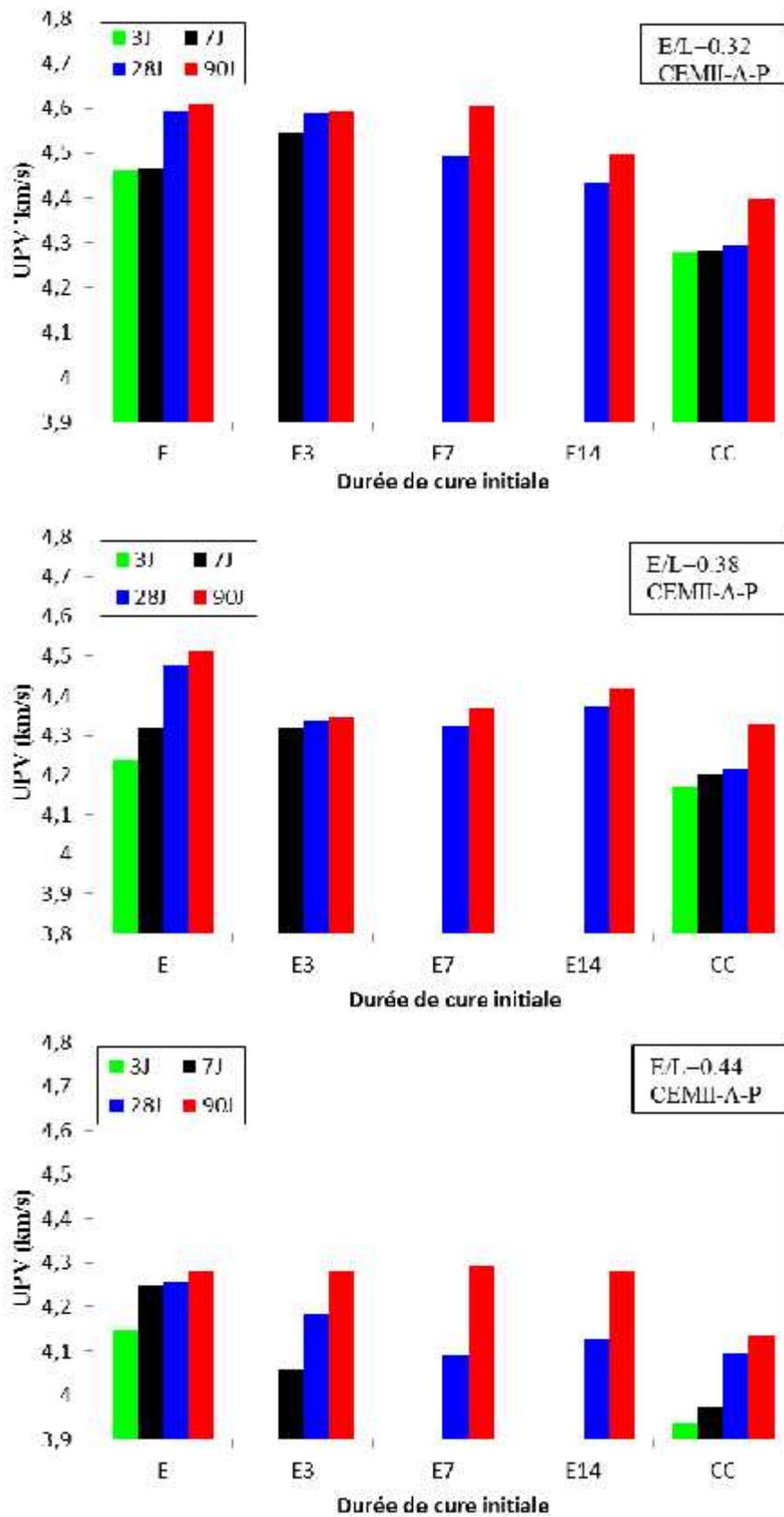


Figure 5. 8: Vitesse ultrasonore en fonction du temps et la durée de cure initiale (CEMII-A-P).

L'UPV des échantillons de BAP ($E/L = 0,32$) durcie totalement ou partiellement dans l'eau (Tableaux 5.3 et 5.4) varient de 4,440 à 4,590 km/s et de 4.460 à 4.610 pour les BAP-C32 et BAP-P32 respectivement.

Cependant, les valeurs d'UPV des échantillons de BAP ($E/L = 0,32$) durcies dans le CC pendant les mêmes périodes variaient de 4,100 à 4,390 km/s et de 4.278 à 4.396 km/s pour les BAP-C32 et BAP-P32 respectivement. En outre, les valeurs maximales de l'UPV ont été atteintes dans les BAPs (E7-90) avec un rapport E/L de 0,32. En revanche, dans le CC, la valeur minimale de l'UPV a été obtenue dans l'échantillon de BAP avec un rapport E/L de 0,44. L'augmentation de la vitesse d'impulsion au jeune âge de séchage car le taux de gain de résistance était plus élevé que le taux de perte de la teneur en humidité (Al-Sugair 1995).

5.3.2 Indice de rebondissement

Les Figures 5.9 et 5.10 montrent l'évolution de l'indice de rebondissement des mélanges de BAP en fonction de la durée de cure humide initiale dans un climat chaud. Nous remarquons que les valeurs de l'indice de rebondissement (IR) augmentent avec le temps, en outre, lorsque le rapport E/L augmente les valeurs de l'IR diminuent. Les éprouvettes de BAP conservées dans le climat chaud présentent des valeurs de l'IR inférieur aux valeurs des éprouvettes conservées dans l'eau est ceci quelque soit le rapport E/L . Les valeurs de l'indice de rebondissement des éprouvettes de BAP à base du ciment CEMII-A-P sont légèrement supérieures à celles des éprouvettes de BAP à base du ciment CEMII-A-C et ceci quelque soit le rapport E/L . En outre, nous constatons qu'une durée de cure humide initiale de sept jours est suffisante pour avoir les valeurs supérieurs de l'indice de rebondissement est ceci quel que soit le type de ciment et le rapport E/L .

Tableau 5.5: Valeurs de l'indice de rebondissement en fonction de la durée de cure humide initiale (CEMII-A-C).

E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	41.2	44	45.5	46	33.8	40.2	43.8	44.3	29.3	34	38.2	40
E3		43.3	43.7	45.2		36.3	39.5	43.2		34.8	36.2	38.2
E7			48.1	48.3			45.7	46.7			41.3	44
E14			48	48.2			45	45.3			40.3	42.7
CC	34	37.3	40.2	43.3	32.2	33	37.3	40.1	28.3	33.7	38.5	38.7

Tableau 5.6: valeurs de l'indice de rebondissement en fonction de la durée de cure humide initiale (CEMII-A-P).

E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	39.8	42.7	48	48.7	35.2	41	45	48.2	32.3	34.5	41.3	44
E3		39.2	45.7	49.7		36.3	42.8	47		35	38.8	42.2
E7			47.8	49.8			44	48.5			41.5	44
E14			49.5	51.7			45	48.7			41.2	43.7
CC	34.8	37.8	39	46.8	33.7	34.7	37.7	43.8	33.5	34	37.2	40.2

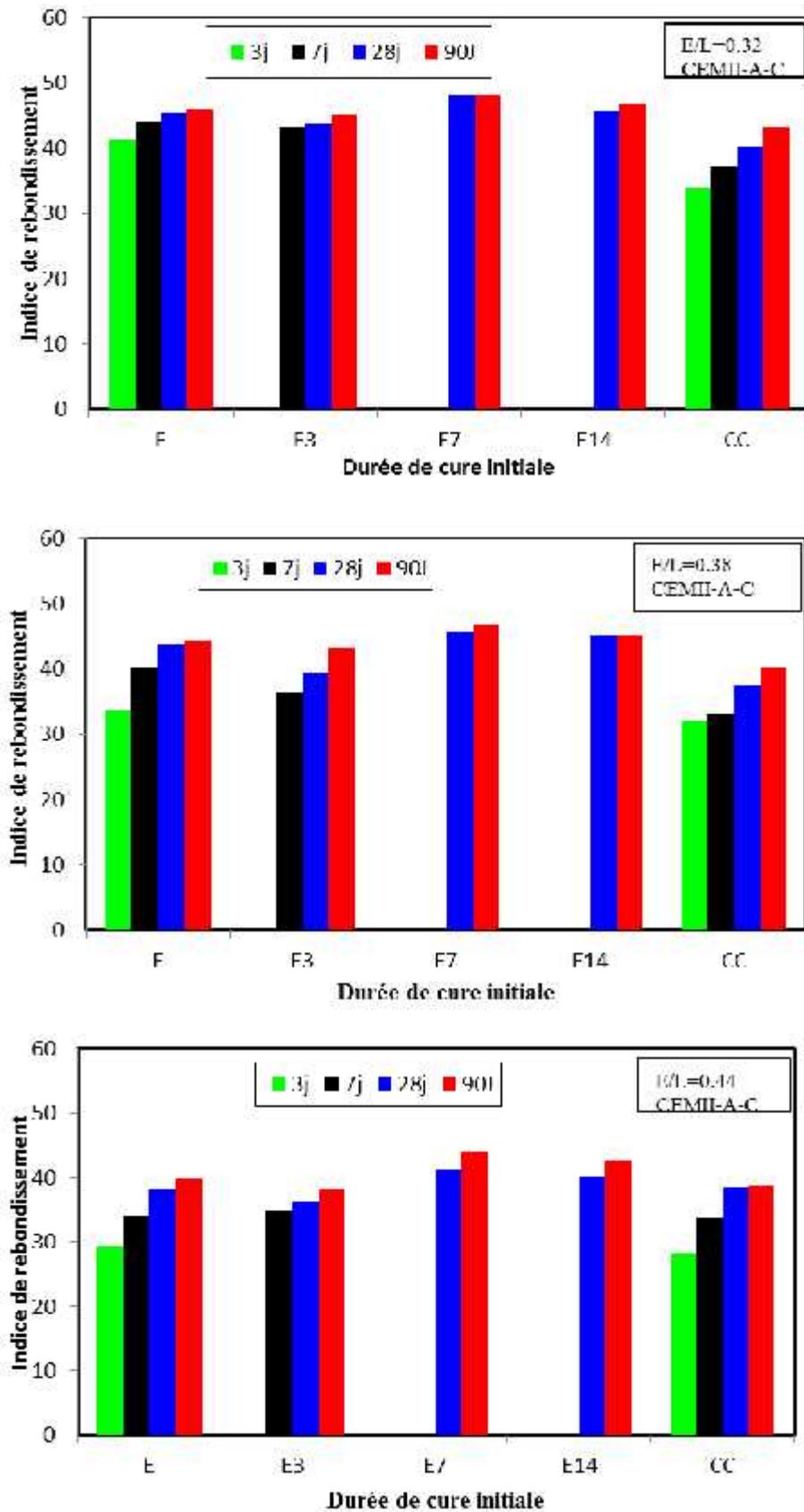


Figure 5.9: Indice de rebondissement des BAPs en fonction du mode de cure (CEMII-A-C).

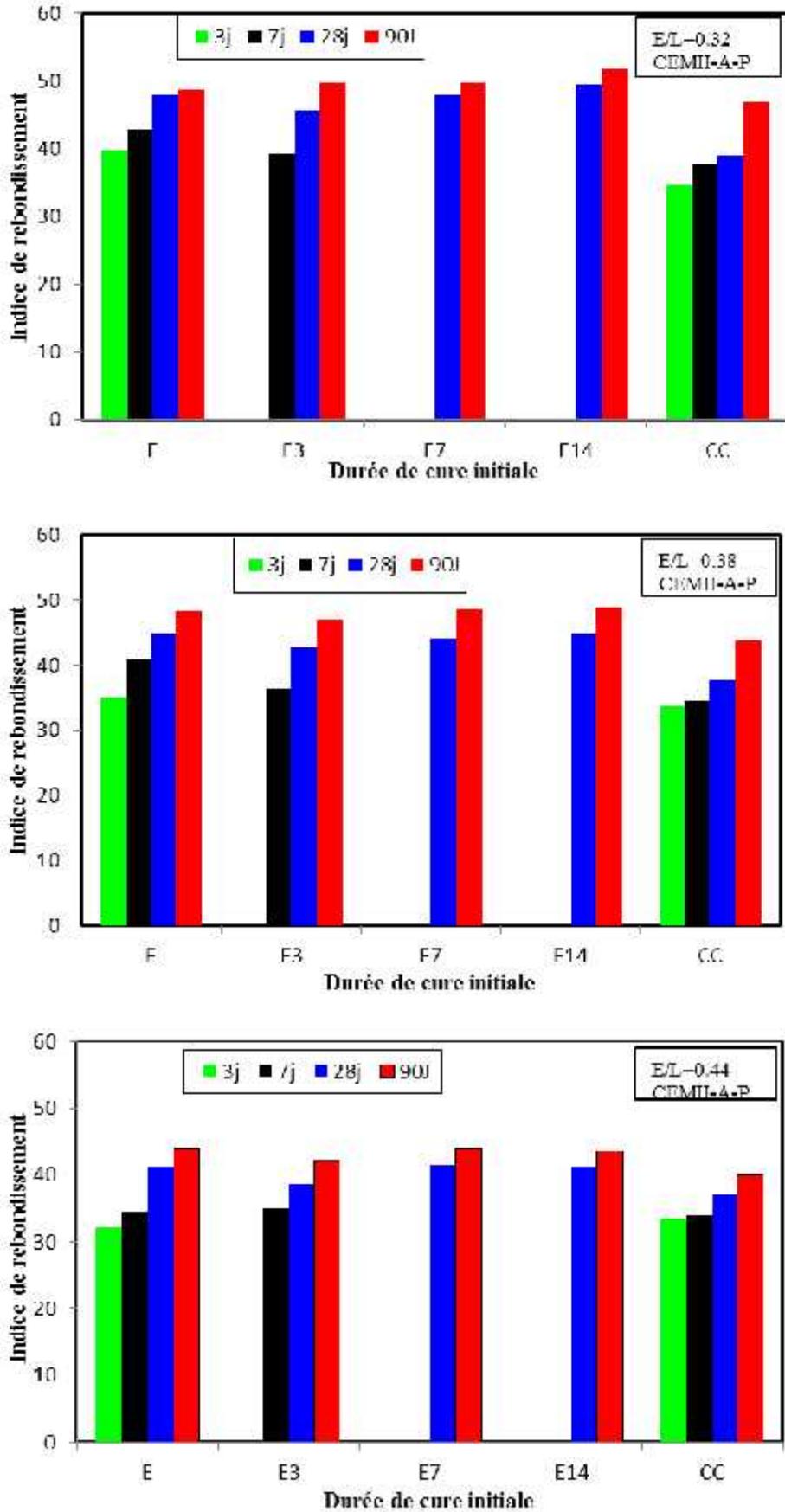


Figure 5.10: Indice de rebondissement des BAPs en fonction du mode de cure (CEMII-A-P).

5.3.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonore

La relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) des échantillons de BAP considéré séparément a été donnée dans le [Tableau 5.7](#). Nous constatons que les coefficients de corrélation des relations entre la résistance à la compression et l'UPV varient entre 0.824 et 0.938. En outre, ses coefficients de corrélation sont légèrement supérieurs pour les mélanges de ciment CEMII-AP (BAP-P).

Tableau 5.7: Comparaison des relations entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique.

Type de ciment	Equations	R ²	Eq.
CEMII-A-C	$R_c = 0.791.e^{0.977P_v}$	0.843	5.1
	$R_c = 53.93.P_v - 178.2$	0.824	5.2
	$R_c = 0.116.P_v^{4.198}$	0.839	5.3
CEMII-A-P	$R_c = 0.118.e^{1.406.P_v}$	0.938	5.4
	$R_c = 72.17.P_v - 258.9$	0.932	5.5
	$R_c = 0.007.P_v^{6.056}$	0.938	5.6

La relation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) des échantillons de BAP a été donnée dans la [Figure 5.11](#) pour les deux mélanges BAP-C et BAP-P séparément.

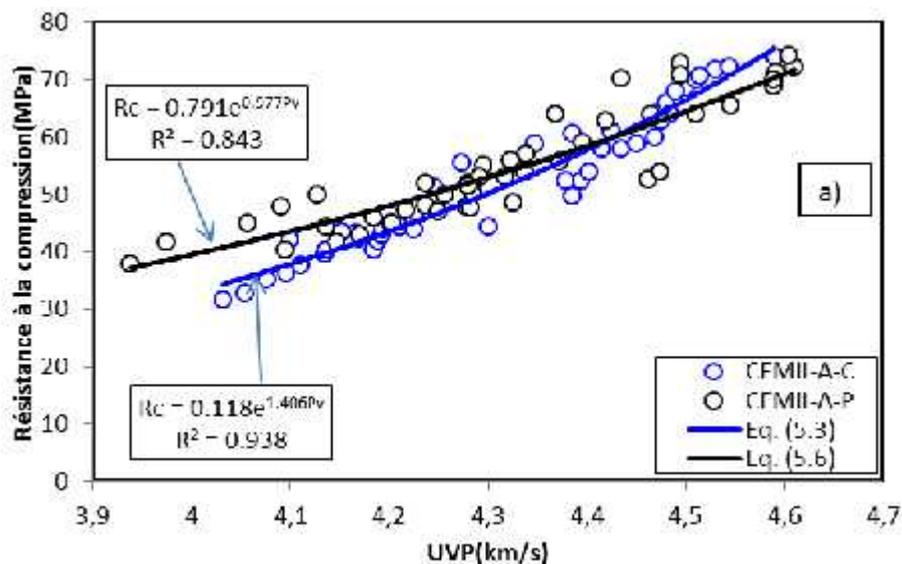


Figure 5.11: Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique.

Les valeurs d'UPV ont augmenté avec l'augmentation de la résistance à la compression pour tous les échantillons de BAP. Des résultats similaires ont été obtenus dans des études

antérieures (Lina Rojas-Henao et al. 2012; Ulucan et al. 2008; Qasrawi 2000). Breyse (2012), a signalé que de nombreux types de relations empiriques peuvent être utilisées, le modèle le plus commun étant le modèle exponentiel. Tous les résultats de la résistance à la compression moyenne, (R_c) et la vitesse d'impulsion ultrasonique, (UPV), pour chaque composition à chaque âge.

Il existe une bonne corrélation exponentielle, avec un coefficient de détermination $R^2=0.862$, entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion pour tous les échantillons de BAP étudiés avec les trois rapports E/L et les deux types de ciment (Eq. 5.7).

$$R_c = 0.315e^{1.185.P_v} \quad (R^2=0.862) \quad (5.7)$$

Où:

R_c : résistance à la compression (MPa)

P_v : vitesse d'impulsion ultrasonique (km/s)

Rajagopalan et al. (1973) ont proposé une corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression du béton pour certains mélanges typiques. Cette étude présente simultanément les mesures de la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression faite sur des cubes de 15 cm à différents âges de 1 à 28 jours, indiquant une relation linéaire entre la résistance à la compression et l'UPV. Demirboga et al. (2004) ont constaté une relation exponentielle entre la résistance à la compression et l'UPV pour le béton avec des ajouts minérale. D'après Trtnik et al. (2009) l'équation la plus couramment utilisée est: $R_c = ae^{b.P_v}$. Où a et b sont des paramètres empiriques déterminés par la méthode des moindres carrés. Les corrélations entre la résistance à la compression et l'UPV trouvées par les chercheurs Lina et al. (2012), Zulfu et al. (2008) et Canan (2003) sont mentionnées dans le Tableau 5.8.

Tableau 5.8: Equations des corrélations entre la résistance à la compression et UPV des auteurs.

Auteurs	$R_c = a \cdot e^{b.P_v}$		Coefficient de corrélation (R^2)
	a	b	
(Lina Rojas et al. 2012)	0.35	1.12	0.76
(Zulfu et al. 2008)	0.0031	2.0714	0.74
(Canan, 2003)	0.2413	1.166	0.993

La figure 5.12 montre la comparaison entre la corrélation proposée (Eq. 5.7) et corrélation proposées par différents chercheurs.

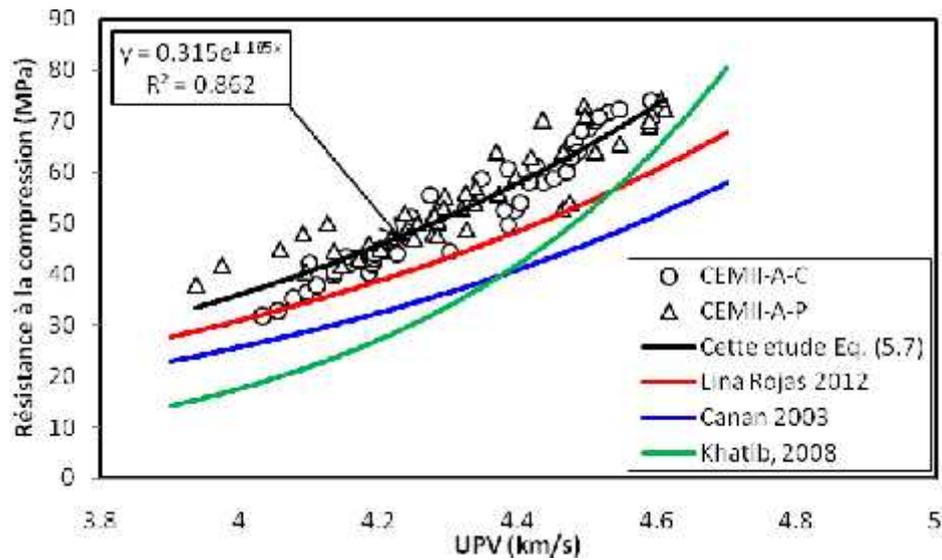


Figure 5.12: Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique.

5.3.4 Relation entre la résistance mécanique et l'indice de rebondissement

L'évaluation de la résistance à la compression est basée sur des corrélations empiriques établies entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement correspondant. Cependant, ce rapport reliant la résistance avec l'indice de rebondissement n'est pas unique, car il est affecté par beaucoup de facteurs, par exemple, type et dosage en granulats et en ciment, rapport E/L, et la teneur en humidité.

Les expressions couramment utilisées concernant la relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement (IR) sont des corrélations linéaires, puissance et polynomiales (Rojas-Henao et al. 2012 ; Breyse 2012).

Les relations entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement (IR) des échantillons de BAP considérés séparément ont été données dans le [Tableau 5.12](#). Nous constatons que les coefficients de corrélation des relations entre la résistance à la compression et l'IR varient entre 0.713 et 0.790.

Tableau 5.9: Comparaison des relations entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement.

Type de ciment	Equations	R ²	Eq.
CEMII-A-C	$R_c = 1.991 \cdot IR - 28.44$	0.743	5.8
	$R_c = 0.208 \cdot IR^{1.488}$	0.734	5.9
	$R_c = 0.089 \cdot IR^2 - 5.012 \cdot IR + 106.9$	0.790	5.10
CEMII-A-P	$R_c = 1.569 \cdot IR - 10.94$	0.711	5.11
	$R_c = 0.714 R_B^{1.16}$	0.713	5.12
	$R_c = 0.067 R_B^2 - 4.055 R_B + 104.4$	0.743	5.13

Il existe une corrélation polynomiale, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,744$, entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement (IR) pour tous les échantillons de BAP réalisés avec les trois rapports E/L et les deux types de ciment (Eq. 5.14).

$$R_c = 0.050 \cdot IR^2 - 2.355 \cdot IR + 62.84 \quad (R^2 = 0.744) \quad (5.14)$$

Il est à noter que [Lina Rojas-Henao et al. \(2012\)](#). [Lina et al. \(2012\)](#) ont proposé une relation polynomiale entre la résistance en compression et l'IR avec un coefficient $R^2 = 0.822$. La comparaison entre cette relation et l'équation 5.14 est donnée par la [Figure 5.13](#). On constate que les deux équations donnent des résultats similaires dans la plage des résultats étudiés.

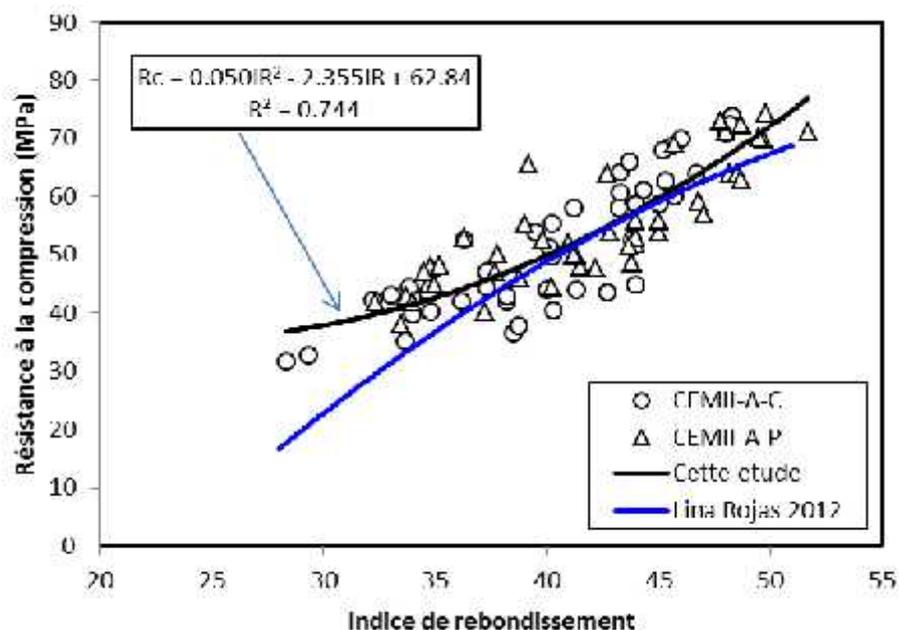


Figure 5.13: Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement

5.4 Module d'élasticité des BAP en fonction du mode de cure

Pour calculer le module d'élasticité (E_d) l'équation 5.15 suivante a été utilisée:

$$E_d = 10^5 \times V^2 \times (M_v/g) \quad (5.15)$$

Où E_d est le module d'élastique dynamique (GPa), V est la Vitesse d'impulsion ultrasonore (m/s), M_v est la masse volumique de l'échantillon (kg/dm^3) et g est l'accélération due à la gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Les valeurs du module d'élasticité dynamique du béton sont données par les Tableaux 5.10 et 5.11.

Tableau 5.10: Module d'élasticité des BAPs à la base du ciment CEMII-A-C

Ed (GPa)												
E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	48.4	48.7	48.9	49.2	44.6	45.0	45.6	46.1	38.7	39.3	39.9	41.7
E3		47.5	48.0	48.5		44.8	45.4	45.6		39.8	40.0	40.5
E7			48.5	50.9			44.7	46.5			39.4	42.0
E14			49.5	50.1			43.3	46.5			38.7	39.7
CC	42.0	42.5	43.1	45.5	39.9	39.9	40.0	40.3	37.1	37.5	37.9	38.2

Tableau 5.11: Module d'élasticité des BAPs à la base du ciment CEMII-A-P

Ed (GPa)												
E/L	0.32				0.38				0.44			
	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J	3J	7J	28J	90J
E	47.5	48.1	49.9	50.7	42.0	42.9	46.7	47.5	41.3	42.5	42.8	43.0
E3		48.0	48.9	49.8		42.8	43.1	43.6		38.0	39.8	41.6
E7			47.5	50.4			42.5	44.6			38.2	41.4
E14			46.7	48.3			44.7	45.9			39.6	41.9
CC	43.4	44.1	44.5	45.1	40.2	40.6	40.8	43.2	36.1	36.3	37.7	38.6

Les résultats des tests de modules d'élasticité dynamiques réalisés à 28 et à 90 jours sont présentés dans Les Figures 5.14 et 5.15. Le module d'élasticité a été mesuré selon la norme ASTM C 469 (ASTM 94).

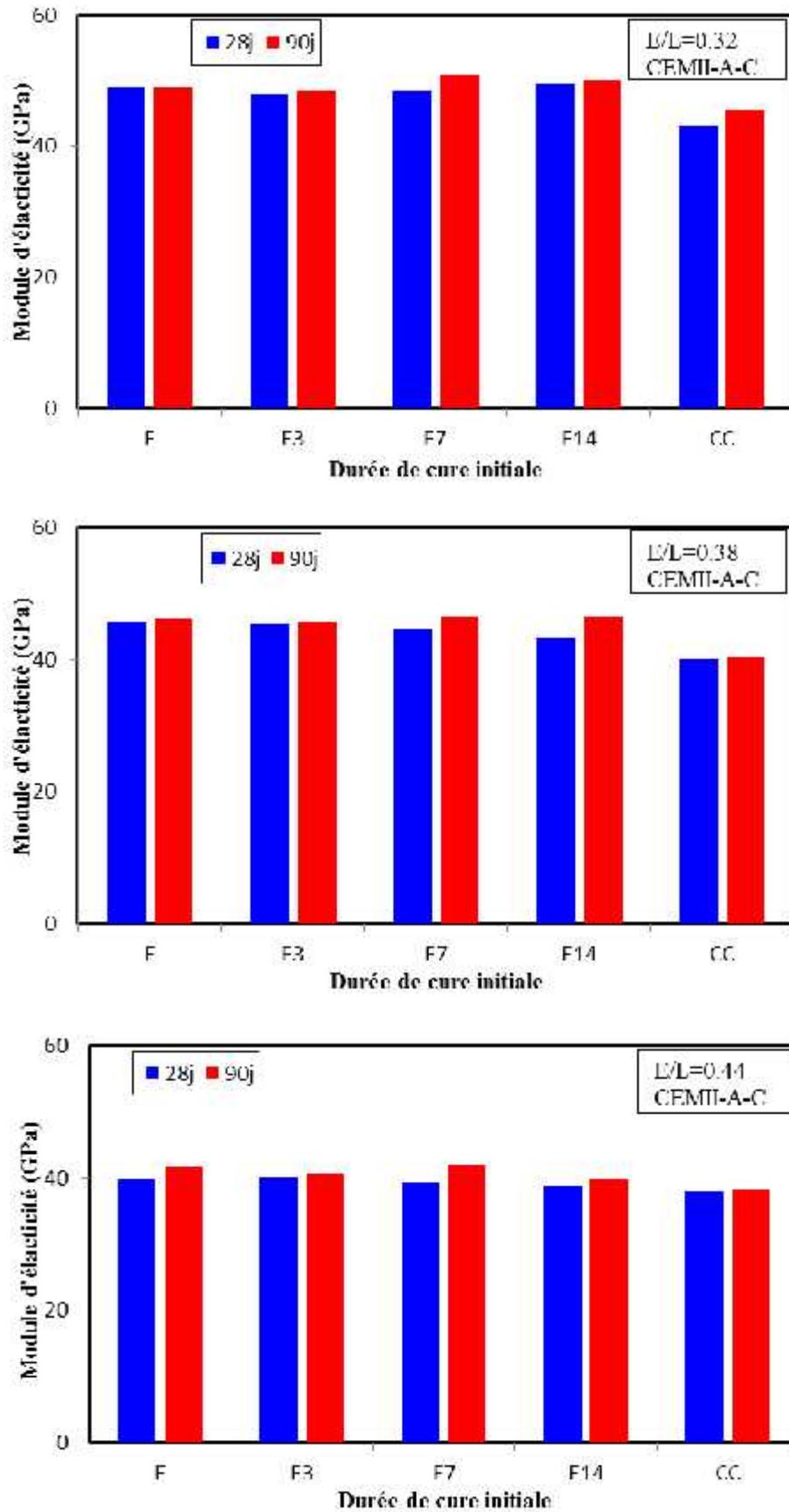


Figure 5.14: Module d'élasticité des BAPs (ciment CEMII-A-C).

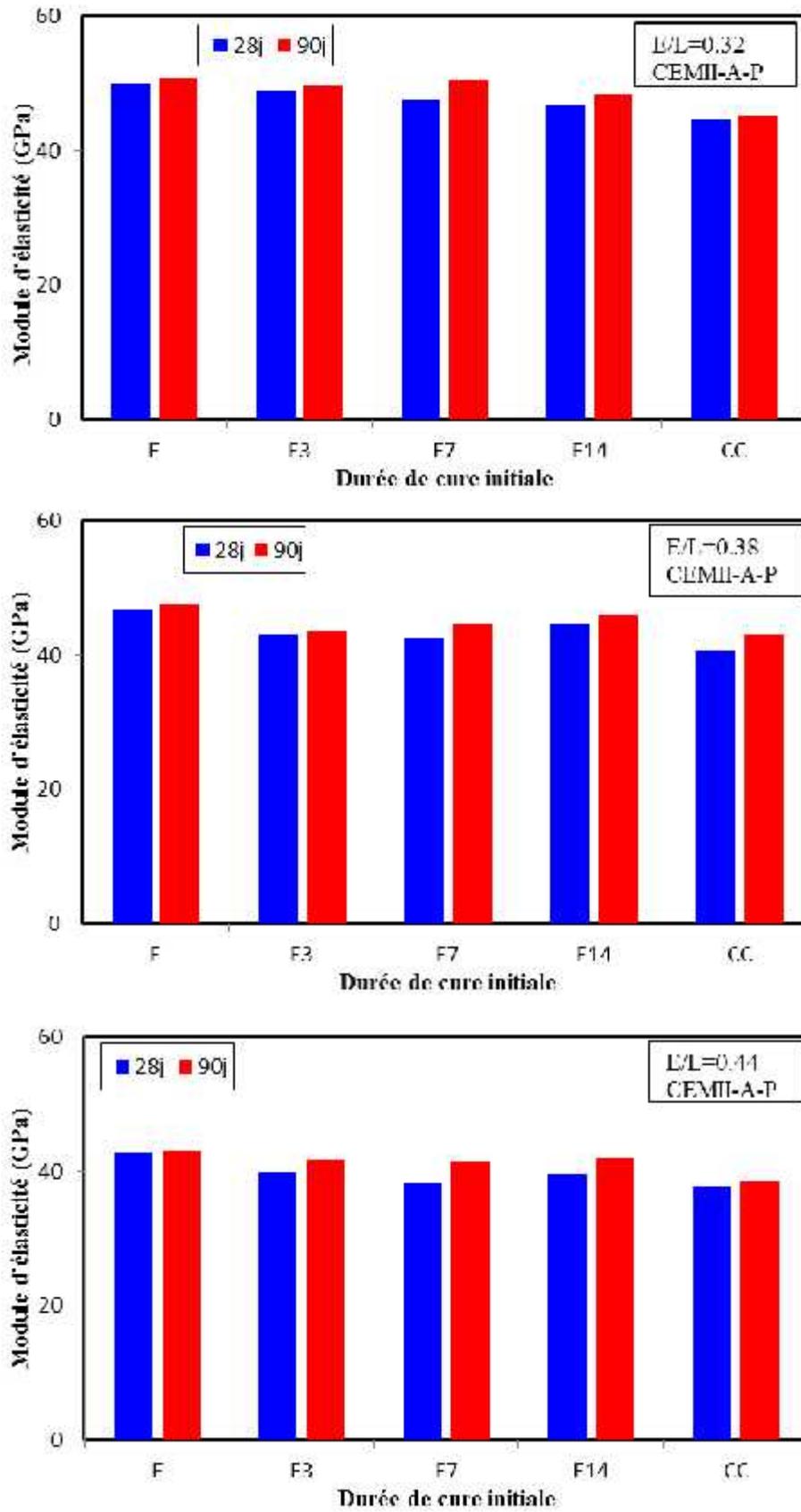


Figure 5.15: Module d'élasticité des BAPs (ciment CEMII-A-P).

On constate que le climat chaud diminue le module d'élasticité des BAPs. Cette diminution est plus prononcée pour les mélanges BAP-C44 et BAP-P44.

En raison de la contribution considérable des agrégats à la rigidité globale du béton, on suppose souvent que le BAP avec son contenu en pâte plus élevé se caractérise par un module d'élasticité faible. En tant que type spécial de béton, le BAP pourrait indiquer une relation contrainte-déformation différente, puisque les mélanges de BAP ont généralement une quantité inférieure d'agrégats grossiers. Des études antérieures sur les modules d'élasticité dynamiques de BAP ont abouti à des résultats contradictoires. Les [Figures 5.13 et 5.14](#) montrent qu'il n'existe pas de différences majeures concernant les valeurs du module d'élasticité des six mélanges est ceci de 3 jusqu' à 90 jours de cure. D'autre part, nous remarquons que le module d'élasticité des éprouvettes de BAP conservées dans l'eau est supérieur à celui des éprouvettes exposées au climat chaud. En outre, le module d'élasticité des mélanges avec un rapport $E/L=0.32$ est supérieur aux autres mélanges quel que soit le type de ciment.

[Peneaud et al. \(2005\)](#) ont analysés l'effet du volume de la pâte et du rapport E/C. En variant le volume de la pâte entre 359 et 452 l/m³, une diminution d' E_d a été constatée pour une augmentation du volume de la pâte.

Selon [Persson \(2000\)](#), le module élasticité de BAP correspondait bien aux mêmes propriétés que le béton traditionnel lorsque la résistance était maintenue constante.

[Roziere et al. \(2007\)](#) ont rapporté que le module d'élasticité des mélanges de BAP a diminué lorsque le volume de la pâte augmente. Cela s'explique par l'hypothèse que les agrégats sont généralement plus rigides que la pâte. [Leemann et al. \(2010\)](#) ont mené des recherches pour étudier l'influence du volume de la pâte et du type de ciment sur le module E_d et le développement de la résistance à la compression sur trois mélanges de BAP et trois mélanges de béton conventionnel. Ils ont constaté que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticités inférieures par rapport aux bétons conventionnels. D'après [Jacobs et al. \(1999\)](#) le module d'élasticité statique de BAP est inférieur à celui d'un Béton conventionnel. Ceci est dû à la taille de grain maximale minimale de BAP et à sa teneur en pâte de ciment plus élevée.

5.4.1 Corrélation entre le module d'élasticité dynamique E_d et la résistance à la compression

Il paraît intéressant de relier les valeurs de module d'Young avec les résistances mécaniques expérimentales, comme c'est le cas dans de nombreux codes de calculs (Eurocode 2, règles BAEL). L'Eurocode 2 (2001) préconise la formule suivante pour l'estimation du module d'élasticité, un facteur de 0.8 été utilisé pour convertir la résistance en compression d'un cube en cylindre:

$$E_d = 22 \times \left[\frac{1}{0.8 \cdot 10} R_c \right]^{0.5} \quad (5.16)$$

Avec R_c : la résistance moyenne en compression.

Les règles BAEL modifiées (99), quant à elles, définissent le module égale à :

$$E_{c,j} = 11000 \times \sqrt[3]{f_{c,j}} \quad (5.17)$$

Dans cette formule, $f_{c,j}$ indique la résistance en compression caractéristique. Nous la prendrons forfaitairement égale à $f_{cm}/1,15$.

La Figure 5.16 présente la comparaison entre la corrélation établie à partir de nos résultats expérimentaux et les équations proposées par l'EC2 et le BAEL 99.

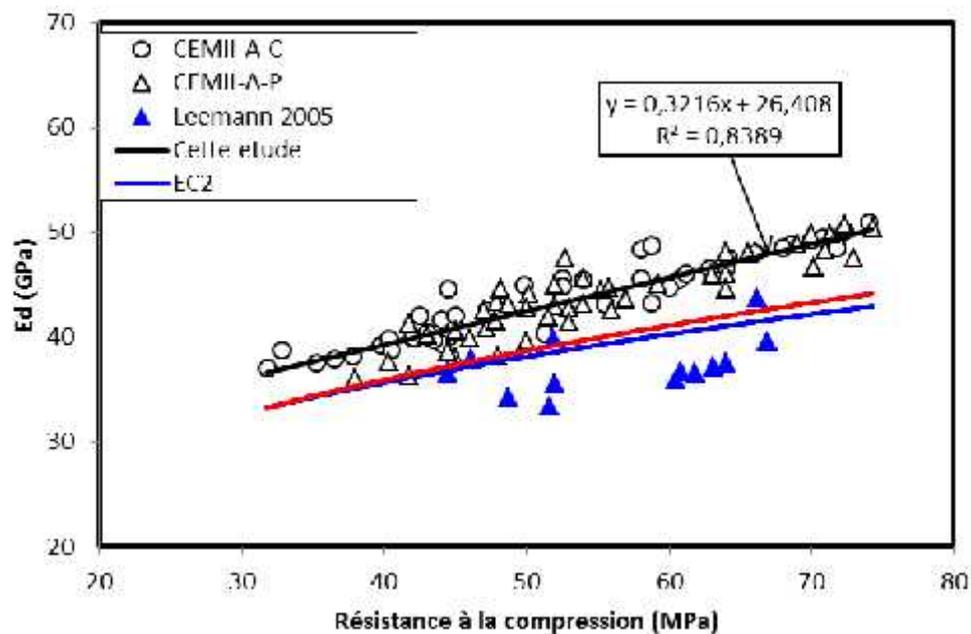


Figure 5.16: Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.

A partir de la [Figure 5.16](#) on remarque qu'il existe une bonne corrélation de forme puissance entre le module (E_d) et la résistance (R_c) avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.831$. On constate, aussi, que le module d'élasticité augmente lorsque la résistance à la compression augmente.

5.5 Conclusion

Le climat chaud affecte négativement les propriétés mécaniques des BAPs, habituellement il diminue la résistance à la compression. Cependant, certaines précautions doivent être prises en compte lors du durcissement du béton par temps chaud. A cet effet, les résultats obtenus ont montré que, quelque soit le type de liant et le rapport E/L, la durée de cure humide initiale optimale est de 7 jours.

D'autre part, on a observé que la résistance à la compression pouvait être estimée en utilisant des techniques non destructives vitesse ultrasonique (UPV) et l'indice de rebondissement (IR). Cependant, il existe une bonne corrélation exponentielle entre UPV et la résistance à la compression et une relation polynomiale entre IR et la résistance à la compression. De plus, il existe une très bonne corrélation entre le module d'élasticité E_d et la résistance à la compression.

Chapitre 6:

DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

6.1 Introduction

Après avoir étudié l'impact d'un bétonnage par temps chaud à l'état durci sur les comportements mécaniques du BAP, il est relativement important d'étudier sa tenue dans le temps. En effet, le matériau « béton » est conçu pour être pérenne et résister à toutes agressions de l'environnement extérieur durant sa phase de service. Les durées de vie garanties par les textes normatifs (EN206-1) sont respectivement de 50 ans et inférieures à 100 ans pour les bétons de bâtiments ou d'ouvrages d'art. Dans le temps, l'une des préoccupations majeures pour le béton est d'assurer la durabilité contre tous les dommages causés par l'environnement extérieur. En effet, les attaques physiques et chimiques dans l'environnement peuvent entraîner une altération de la durabilité du matériau et conduire ainsi à une altération de ses propriétés à l'état durci. Ces dommages sont généralement des phénomènes complexes impliquant les écoulements de fluide à travers la matrice poreuse.

6.2 Effet de la durée de cure initiale sur le coefficient de Sorptivité des BAPs

L'essai de Sorptivité permet de mesurer le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de béton, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Plus l'absorption capillaire est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

Le coefficient de Sorptivité (S) estimé utilisant l'équation 3.5 (voir § 3.9.1) sont récapitulés des les tableaux 6.1 et 6.2 pour les deux ciments CEMII-A-C et CEMII-A-P respectivement.

Tableau 6.1: Coefficient de Sorptivité du ciment CEMII-A-C.

E/L	0.32		0.38		0.44	
	28j ($\times 10^{-3}$)	90 j ($\times 10^{-3}$)	28j ($\times 10^{-3}$)	90j ($\times 10^{-3}$)	28j ($\times 10^{-3}$)	90j ($\times 10^{-3}$)
E	7.0	6.0	12.0	10.0	17.0	10.0
E3	8.0	7.0	13.0	9.5	18.5	11.0
E7	8.5	7.2	12.8	9.7	18.5	10.5
E14	8.2	7.3	12.3	10.6	18.0	11.5
CC	15.0	10.7	20.0	12.7	25.3	15.3

Tableau 6.2: Coefficient de Sorptivité du ciment CEMII-A-P.

E/L	0.32		0.38		0.44	
	28j ($\times 10^{-3}$)	90 j ($\times 10^{-3}$)	28j ($\times 10^{-3}$)	90j ($\times 10^{-3}$)	28j ($\times 10^{-3}$)	90j ($\times 10^{-3}$)
E	13.5	6	15.5	7	18	10.5
E3	13.7	10	17	12	18.7	14
E7	17.5	13.5	18	14	20	16
E14	15	12	19	15	22	17
CC	19	15.3	23	19.7	31	24

Les coefficients de Sorptivité (S) sous forme d'histogramme, pour les deux durées de conservation (28 et 90 jours), sont présentés dans les [Figures 6.1](#) et [6.2](#) pour les deux ciments composés CEMII-A-C et CEMII-A-P respectivement. Nous constatons tout d'abord que le coefficient de Sorptivité augmente avec l'augmentation du rapport E/L ce qui est en accord avec les résultats de [Nagaratnam et al. \(2015\)](#). Le coefficient de Sorptivité des BAPs à 28 jours est systématiquement supérieur à celui des BAPs à 90 jours quel que soit le rapport E/L et le type de ciment. Ceci est dû probablement au confinement des pores. [Kazim et al. \(2008\)](#) ont déjà mentionné la relation entre la résistance mécanique et l'absorption capillaire. Les résultats obtenus montrent que les BAPs immergés dans l'eau présentent un faible coefficient de Sorptivité. La durée de cure initiale réduit sensiblement l'absorption capillaire du BAP. D'autre part, nous avons observé que, indépendamment des rapports E/L et du type de ciment (ajout inerte ou active) le coefficient d'absorption capillaire des éprouvettes conservées dans le climat chaud (CC) est supérieur par rapport aux éprouvettes des autres modes de conservation. Cela était probablement lié au faible degré d'hydratation du ciment causé par une période plus courte de durcissement dans l'eau et également liée aux microfissures formées à la surface de béton résultant de la dissipation précoce de l'humidité du béton ([Chan et Ji 1998](#)). Selon [Nagaratnam et al. \(2015\)](#), la faible quantité d'hydratation produite et la mauvaise microstructure dans la matrice de béton était responsable des valeurs élevées de Sorptivité à 28 jours.

La Sorptivité diminue fortement avec l'âge, alors que l'effet du rapport E/L était prononcé. Avec un rapport E/L de 0,32, la Sorptivité des spécimens de BAP durcie partiellement dans l'eau est semblable à celle qui a été complètement durcie dans l'eau pendant 28 et 90 jours. À titre de comparaison, La plus grande diminution a été obtenue pour les échantillons de BAP réalisés avec un rapport E/L égale à 0,44.

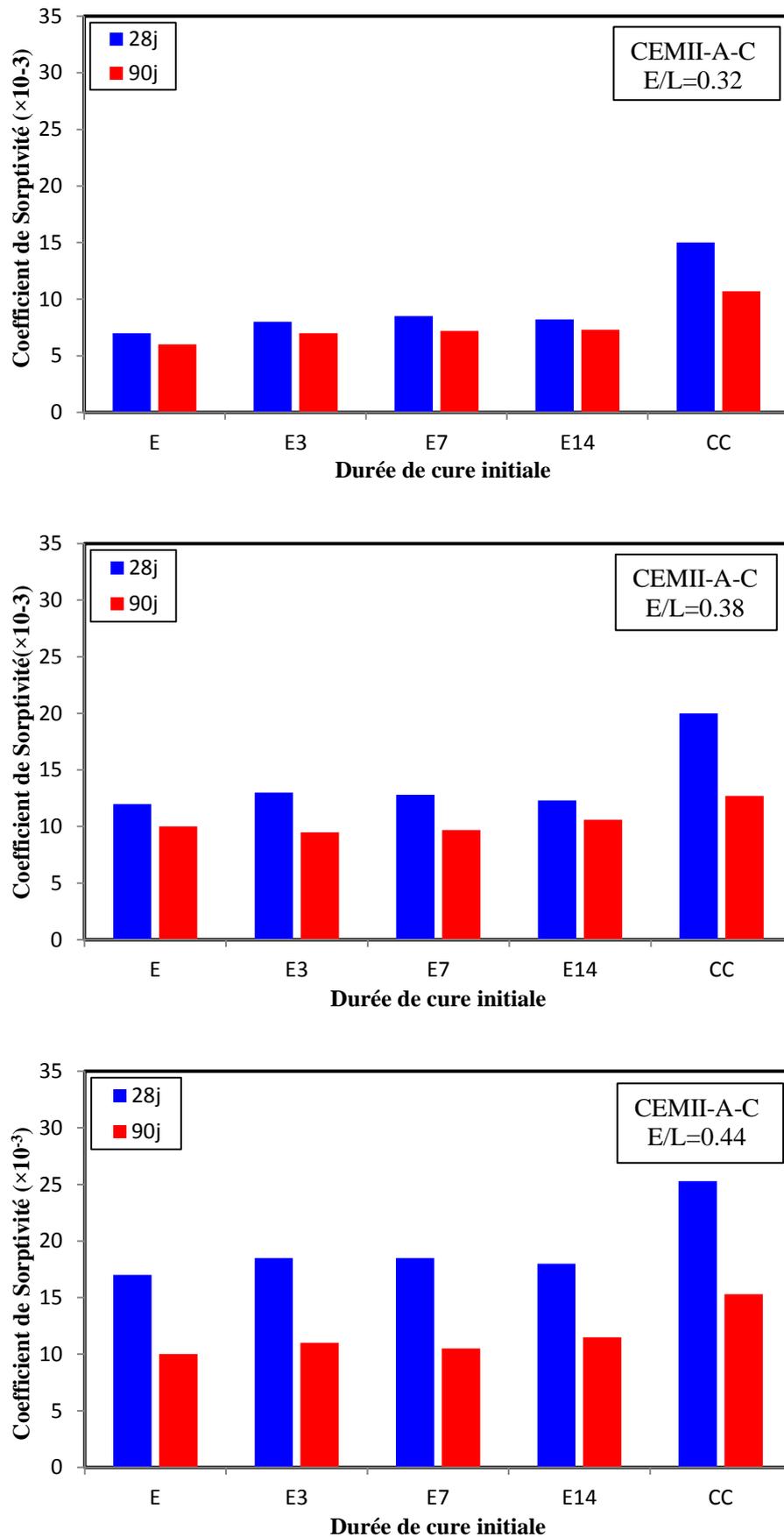


Figure 6.1: Sorptivité des BAP en fonction de la durée de cure initiale (ciment CEMII-A-C).

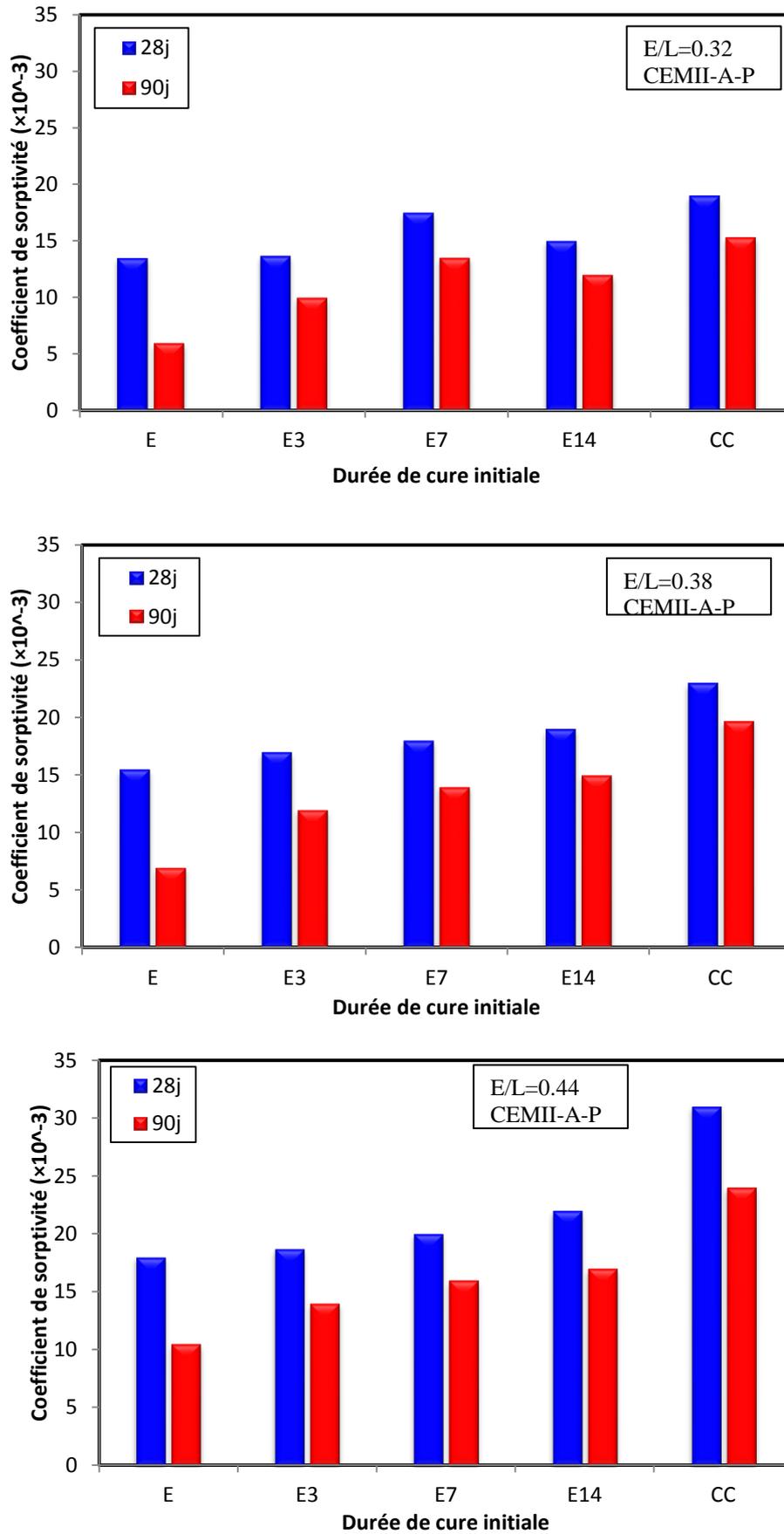


Figure 6.2: Sorptivité des BAPs en fonction de la durée de cure initiale (ciment CEMII-A-P).

La grande diminution est remarquée pour les formulations du BAP-C44. Entre 28 et 90 jours de cure, la diminution est de 41%, 41%, 43%, 36% et 39% pour les modes de cure E, E3, E7, E14 et CC, respectivement. Pour les BAP-C38, la diminution est comprise entre 13,8% et 36,7%. En outre, cette diminution est comprise entre 11% et 29% pour les BAP-C32.

Concernant les formulations du BAP-P44 la diminution de leurs coefficients de Sorptivité entre 28 et 90 jours de cure est de 41.7%, 24.3%, 20%, 22.7% et 22.6% pour les modes de cure E, E3, E7, E14 et CC, respectivement. Pour les BAP-P38, la diminution est comprise entre 15.4% et 54.8%.

Comparaison entre les deux types de ciment (CEMII-A-C et CEMII-A-P), nous remarquons que les valeurs de coefficients de Sorptivité (S) du ciment au calcaire (CEMII-A-C) sont inférieures aux valeurs du ciment à la pouzzolane (CEMII-A-P), et ceci quel que soit rapport E/L et le mode de cure. Cette différence est probablement due à l'effet physique du calcaire à court terme.

La présence du calcaire réduit sensiblement les pores capillaires, l'introduction de l'addition filler calcaire finement broyé, conduit à une densification de la matrice cimentaire. Les grains de filler calcaire s'intercalent dans les pores créés par l'hydratation du ciment entre les granulats et les produits d'hydratation. En outre la présence de la pouzzolane naturelle réduit la Sorptivité mais cette réduction est moins prononcée par rapport à celle du calcaire malgré le remplissage des pores capillaires par le gel C-S-H de seconde génération formé à partir de la réaction de la silice réactive de la pouzzolane naturelle avec la Portlandite qui résulte de la réaction d'hydratation du ciment ([Ghrici et al. 2007](#)).

D'après [Wee et al. \(1995\)](#), la finesse d'un ajout minéral est un paramètre important pour le remplissage des pores dans le béton. Ils ont montré que l'utilisation de matériaux micro filler combinés avec des superplastifiants affectent grandement la structure des pores de béton, et une réduction significative du volume des pores a été obtenue. [Sawicz et Heng \(1986\)](#) ont montré que le calcaire ne change pas seulement la structure des pores du béton mais la structure chimique de la pâte de ciment. Certains chercheurs ([Monteiro et Mehta 1986](#)) ont conclu que l'hydrocarbboaluminate ($C_3A.CaCO_3.11H_2O$) se forme entre l'agrégat calcaire et C3A dans le ciment à la suite de réactions chimiques. Par conséquent, l'interface est renforcée et la résistance du béton augmente.

6.3 Corrélation entre la résistance à la compression et la Sorptivité

La Figure 6.3 montre la relation entre les coefficients de Sorptivité (S) et la résistance à la compression à 90 jours de tous les échantillons de BAP. Cependant, on peut voir d'après la Figure 6.3 que le coefficient de Sorptivité diminue avec l'augmentation de la résistance à la compression.

Pour tous les échantillons de BAP, des relations exponentielles entre la Sorptivité et la résistance à la compression à 90 jours de durcissement peuvent être adoptées. D'après Siad et al. (2014), la diminution est plus importante pour les spécimens de BAP à 90 jours. Sur la base des résultats obtenus, les relations entre la résistance à la compression (R_c) et la Sorptivité (S) à 90 jours pour les deux types de liant sont respectivement. (Eqs.6.2 et 6.3).

$$S = 52,85 e^{-0,022.R_c} \quad (R^2 = 0,7468) \quad \text{pour le BAP-C à 90 jours} \quad (6.2)$$

$$S = 55,71 e^{-0,028.R_c} \quad (R^2 = 0,4254) \quad \text{pour le BAP-P à 90 jours} \quad (6.3)$$

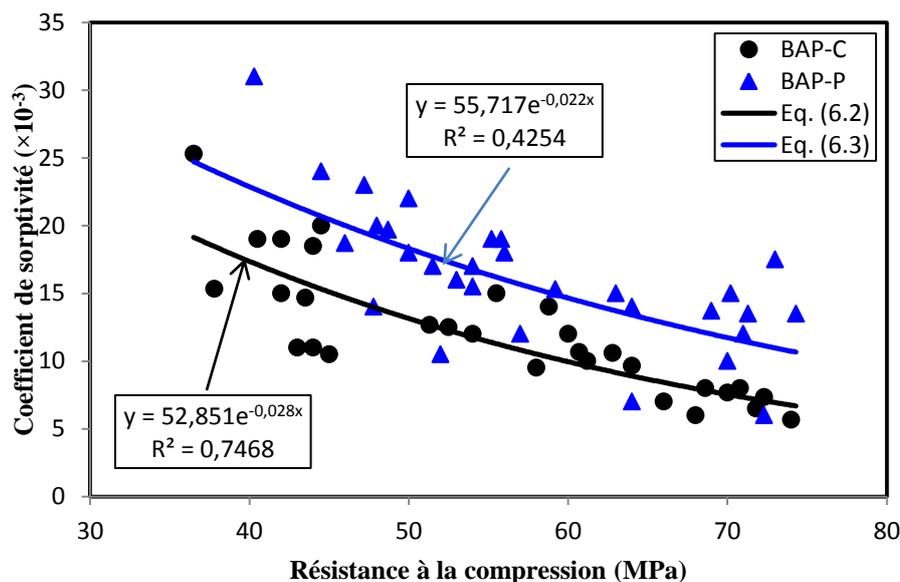


Figure 6.3: Corrélation entre le coefficient de Sorptivité et la résistance à la compression à 90 jours.

On constate que la corrélation entre (S) et (R_c) pour les échantillons de béton BAP-C (Eq. 6.2) est très bonne avec un coefficient de détermination très élevé (> 0.85). Par contre, il existe corrélation moyenne entre ces deux propriétés pour les échantillons de béton BAP-. D'autre part, Leung et al. (2016) ont signalé qu'aucune corrélation évidente n'a pu être obtenue entre la Sorptivité et la résistance des cubes de BAP contenant des cendres volantes ou de la fumée de silice à 28 jours. Ils ont indiqué que la Sorptivité du BAP et sa résistance à la

compression dépendent de la proportion d'adjuvants minéraux et d'autres facteurs environnementaux. En outre, ils ont conclu que la résistance du béton à une période plus longue peut être un indicateur de durabilité (Leung et al. 2016). Il semble que la Sorptivité du BAP incorporant différentes pouzzolanes ou des adjuvants minéraux nécessite encore d'autres investigations.

6.4 Effet de la durée de cure humide sur la Porosité des BAPs

La porosité accessible à l'eau traduit le volume de vide 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). Les résultats obtenus durant cette étude sont récapitulés dans les Tableaux 6.3 et 6.4.

Tableau 6.3: Porosité des mélanges de BAP à base du ciment CEMII-A-C à 28 jours.

Modes de cure	Porosité (%)		
	BAP-C32	BAP-C38	BAP-C44
E28	6.95	8.21	17.50
E3-28	10.05	14.81	18.55
E7-28	8.08	13.20	17.93
E14-28	9.23	13.70	18.57
CC28	10.64	15.42	19.15

Tableau 6.4: Porosité des mélanges de BAP à base du ciment CEMII-A-P à 28 jours.

Modes de cure	Porosité (%)		
	BAP-P32	BAP-P38	BAP-P44
E28	6.31	15.15	16.71
E3-28	12.87	15.86	17.21
E7-28	13.13	15.99	17.17
E14-28	13.01	16.03	17.01
CC28	13.40	16.37	17.51

Les [Figures 6.4 et 6.5](#) présentent les valeurs de porosité accessible à l'eau pour les six BAPs mûris selon les cinq modes de cure. L'illustration graphique des résultats représentés par les [Figures 6.4 et 6.5](#) montre que la porosité croît en fonction du rapport E/L et le taux de croissance diminue en fonction de la durée de cure. De plus, on remarque que la porosité du BAP à base de ciment CEMII-A-C est plus faible que celle du béton à base de ciment CEMII-A-P, et ceci est dû à la finesse de l'addition calcaire. L'addition plus fine a deux effets: elle résulte d'abord dans un emballage plus dense. Une plus grande surface spécifique du ciment CEMII-A-C provoque également une plus grande surface de précipitation pour les produits d'hydratation, et donc une microstructure améliorée et plus dense ([Audenaert 2006](#)).

En outre, les éprouvettes de BAP conservées dans l'eau présentent des valeurs minimales de porosité à 28 jours en comparaison à celle conservés dans les autres modes de cure, A titre d'exemple la différence entre les mélanges BAP-C32, BAP-C38 et BAP-C44 à 28 jours est comprise entre 2.45% et 87.57% suivant le mode de cure et le rapport E/L en considérant les éprouvettes conservés entièrement dans l'eau comme référence. En outre, cette différence est comprise entre 1.79% et 112.36% pour les mélanges BAP-P32, BAP-P38 et BAP-P44 est ceci quel que soit le rapport E/L.

A partir des [Figures 6.4 et 6.5](#), deux tendances semblent se dégager. La première concerne les bétons incorporant du filler calcaire (BAP-C32, BAP-C38 et BAP-C44); le bétonnage par temps chaud semble modifier significativement la porosité comparativement aux matériaux conservés entièrement dans l'eau à 20°C. D'autre part, avec une augmentation de superplastifiant, les bétons fillérisés gâchés à température élevée présentent une diminution de la porosité. Ce résultat peut s'expliquer par un double effet généré par la défloculation des grains de ciment et par une diminution du rapport E/L due à l'évaporation de l'eau lors du gâchage.

La seconde tendance est observée sur les matériaux confectionnés avec la matrice Pouzzolanique (BAP-P). Pour une phase liante à base de Pouzzolane, une hausse des températures de confection et de maturation semblent affecter significativement cet indicateur de durabilité, en effet, la différence de porosité entre les BAPs semble être maximale pour les faibles rapports E/L est devienne minimale pour les rapports E/L fort.

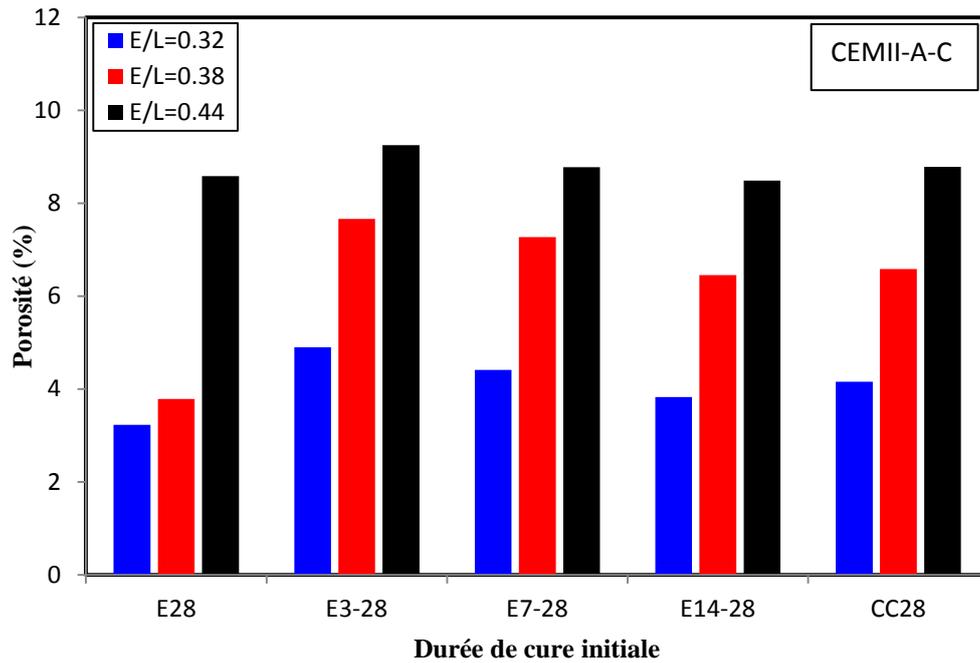


Figure 6.4: Porosité totale à 28 jours en fonction de la durée de cure humide initiale (CEMII-A-C).

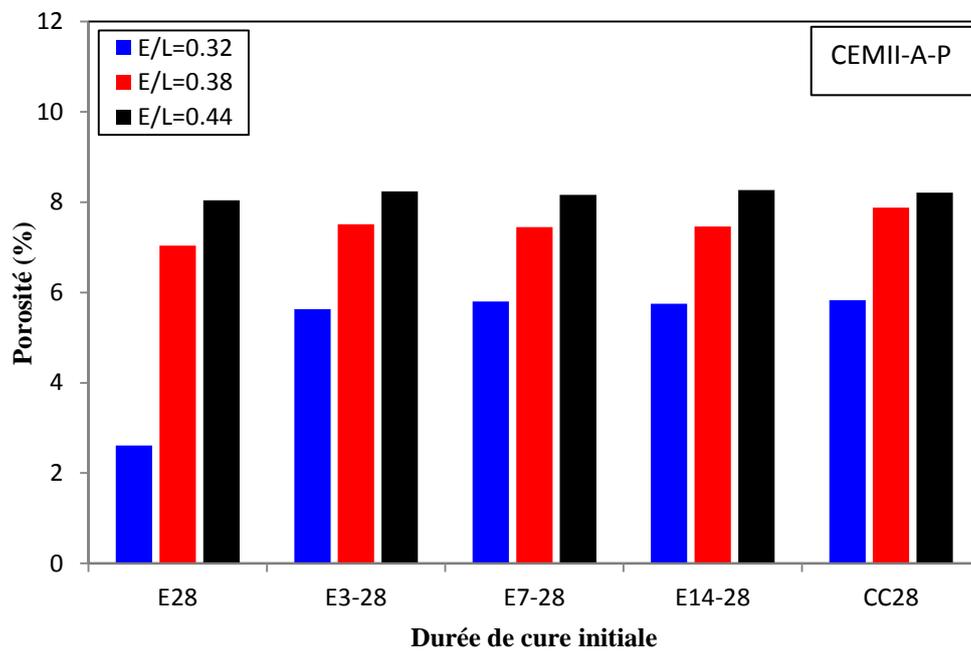


Figure 6.5: Porosité totale à 28 jours en fonction de la durée de cure humide initiale (CEMII-A-P).

6.5 Corrélation entre la résistance à la compression et la Porosité

Selon Assié (2004), la première caractéristique qui devrait être représenté en fonction de la résistance mécanique est la porosité. Ce paramètre est directement lié à la résistance en compression du béton (Bessa et al. 2004).

Les résultats obtenus (Tableaux 5.1, 5.2, 6.3 et 6.4) montrent qu'il existe, entre la résistance à la compression et la porosité à 28 jours, une corrélation linéaire avec un coefficient de corrélation $R=0.8113$ (Eq. 6.4) :

$$P = -2,39R_c + 88,9 \quad (6.4)$$

Avec P la porosité et R_c la résistance à la compression à 28 jours.

La Figure 6.6 montre la variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression à 28 jours. On constate clairement que la porosité diminue lorsque la résistance à la compression augmente ce qui est en accord avec la littérature.

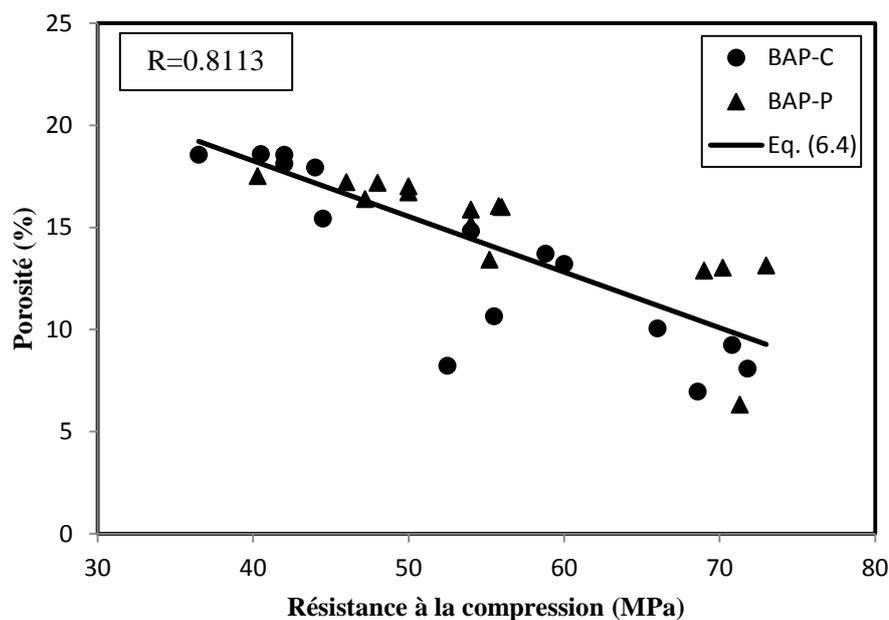


Figure 6.6: Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité.

6.6 Absorption d'eau

L'absorption d'eau traduit la capacité d'un béton à se faire pénétrer par l'eau durant une phase d'immersion totale. Selon les textes normatifs (EN206-1 et EN13369). L'absorption d'eau par test d'immersion, réalisée est décrite dans le chapitre 3, évalue essentiellement la porosité du béton. Cependant, ce test a certaines limites, l'une étant qu'il ne mesure que le volume des

pores accessibles, généralement appelé porosité ouvert, mais cette valeur ne représente pas la porosité absolue du béton puisqu'il ne prend pas en compte le volume des pores fermés (Coutinho 1998).

Les Tableaux 6.5 et 6.6 et les Figures 6.7 et 6.8 montrent que le rapport E/L a une influence significative sur la variation de l'absorption d'eau (volume total des pores pénétrables).

Tableau 6.5: Valeurs d'absorption d'eau des BAP (CEMII-A-C).

Modes de cure	Absorption (%)		
	BAP-C32	BAP-C38	BAP-C44
E28	3.23	3.79	8.59
E3-28	4.90	7.67	9.25
E7-28	4.41	7.27	8.78
E14-28	3.83	6.46	8.49
CC28	4.16	6.58	8.78

Tableau 6.6: Valeurs d'absorption d'eau des BAP (CEMII-A-P).

Modes de cure	Absorption (%)		
	BAP-P32	BAP-P38	BAP-P44
E28	2.61	7.04	8.04
E3-28	5.63	7.51	8.24
E7-28	5.80	7.45	8.16
E14-28	5.75	7.46	8.27
CC28	5.83	7.88	8.21

En outre, On a observé que l'absorption d'eau varie de 5,8 à 7,1%. Il est à noter que tous les mélanges de BAP ont une faible caractéristique d'absorption d'eau (moins de 10%). Ceci est en accord avec les résultats rapportés par Razak et al. (2004). De même, Assié (2004) mentionne que la porosité ouverte du béton, évaluée par l'absorption d'eau par immersion, est un paramètre directement lié à sa résistance mécanique et nécessairement à son rapport E/C. L'influence mentionnée peut être associée au fait que la porosité du béton augmente avec le rapport E/C, c'est-à-dire plus le rapport E/C est grand plus le volume des pores de la matrice de ciment est important, augmentant ainsi le volume des pores accessibles.

Des résultats similaires ont été obtenus par Dinakar et al. (2013) pour des bétons contenant jusqu'à 70% de cendres volantes. Ces auteurs soulignent l'augmentation de l'absorption d'eau par immersion après l'augmentation du taux de remplacement du ciment par l'ajout cimentaire. Khatib (2008), dans ses travaux sur les mécanismes de transport du BAP à haute

teneur en cendres volantes, a constaté qu'il n'y a pas de différence significative entre l'absorption d'eau par immersion entre 28 et 90 jours. Cette conclusion souligne la faible sensibilité de ce test aux changements dans la structure poreuse qui se produisent entre ces âges. [Khatib](#) rapporte que les principaux changements dans l'absorption d'eau se produisent avant 28 jours et qu'à partir de cet âge les changements sont négligeables.

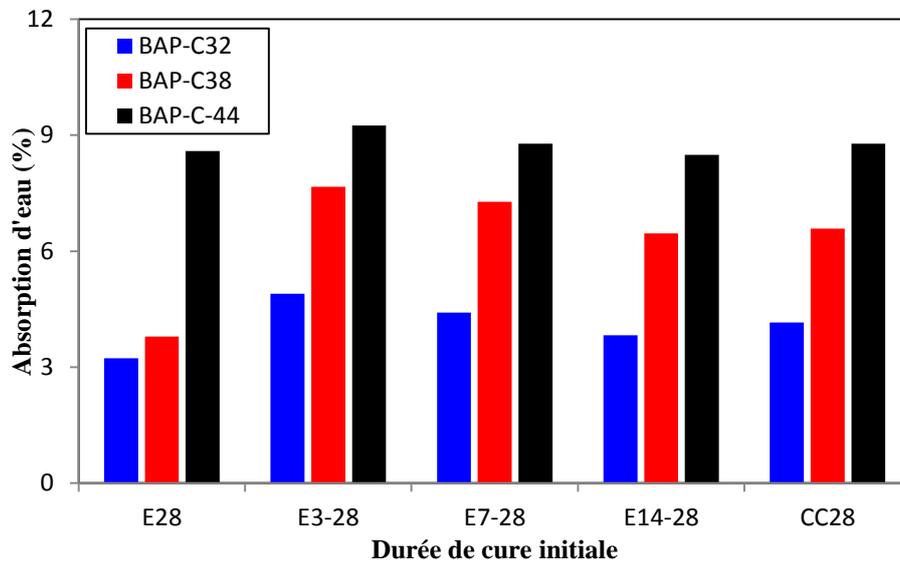


Figure 6.7: Absorption d'eau des BAP en fonction de la durée de cure initiale (CEMII-A-C).

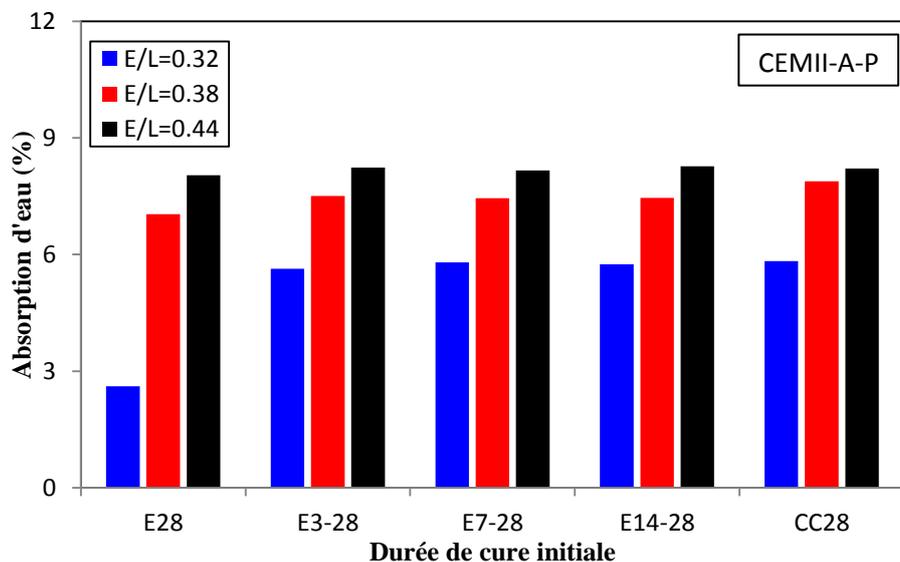


Figure 6.8: Absorption d'eau des BAP en fonction de la durée de cure initiale (CEMII-A-P).

6.7 Corrélation entre la résistance à la compression et l'absorption

Les résultats obtenus montrent qu'il existe entre la résistance à la compression et l'absorption, à 28 jours, une corrélation linéaire avec un coefficient de corrélation $R=0.7899$ (Eq. 6.5) :

$$A_b = -0.134R_c + 14.07 \quad (6.5)$$

Avec A_b l'absorption R_c la résistance à la compression à 28 jours.

La Figure 6.9 montre la variation de l'absorption en fonction de la résistance à la compression à 28 jours. On constate que l'absorption diminue nettement lorsque la résistance à la compression augmente ce qui est en accord avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs (Khatib 2008). D'autre part, la Figure 6.10 montre qu'il existe une excellente corrélation linéaire entre l'absorption d'eau et la porosité avec un coefficient de détermination $R^2=0.954$.

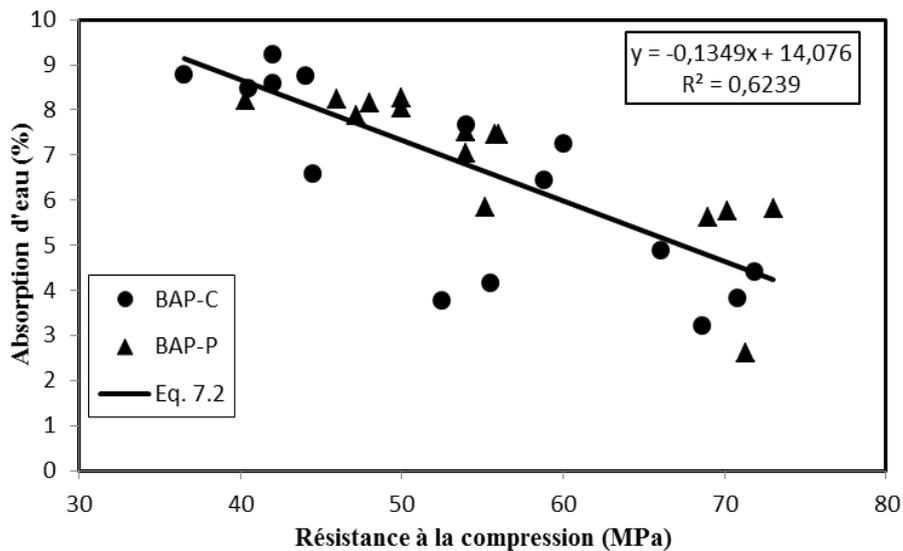


Figure 6.9: Corrélation entre l'absorption et la résistance à la compression.

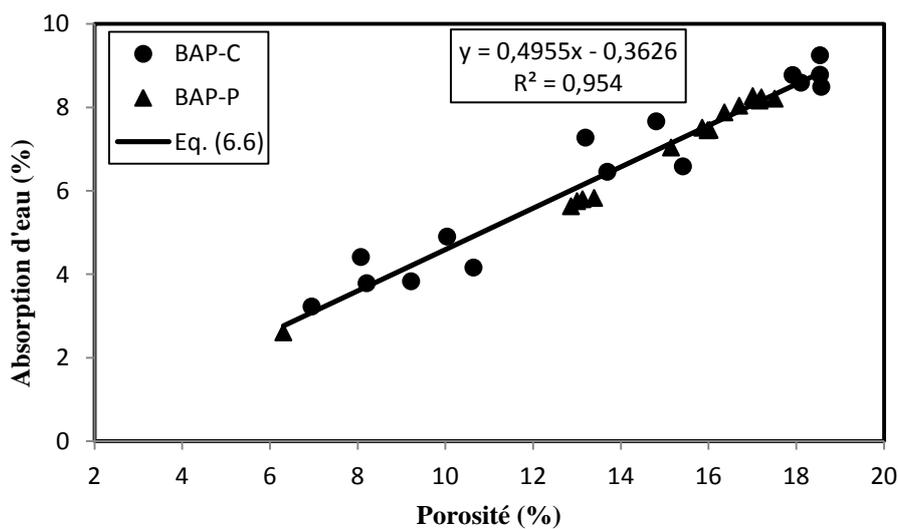


Figure 6.10: Corrélation entre l'absorption et la Porosité.

6.8 Conclusion

Dans ce dernier chapitre consacré aux évolutions des propriétés du matériau dans le temps, trois indicateurs de durabilité ont été étudiés.

Concernant les propriétés de transfert, elles sont globalement significativement affectées par le climat chaud lors de la phase de conception et de maturation (durée de cure initiale). Les propriétés de Sorptivité, de porosité accessible à l'eau et d'absorption d'eau sont dans l'ensemble fortement modifiées induisant donc de modifications du réseau poreux (volume total des pores, taille des pores, connectivité, capacité d'une espèce ionique à pénétrer dans le matériau). La forte modification du réseau poreux peut s'expliquer par l'augmentation de l'hétérogénéité des phases hydratées qui peut se rencontrer pour les matrices ayant subi des élévations de température. Les conclusions suivantes sont dégagées:

- Le coefficient de Sorptivité du BAP à 28 jours est systématiquement supérieur à celui de 90 jours quel que soit le rapport E/L et le type de ciment.
- Les valeurs de coefficients de Sorptivité (S) du ciment au calcaire (CEMII-A-C) sont inférieures aux valeurs de (S) du ciment à la pouzzolane (CEMII-A-P), et ceci quel que soit rapport E/L et le mode de cure.
- Des relations de corrélations exponentielles entre la Sorptivité et la résistance à la compression à 90 jours ont été trouvées.
- Le bétonnage par temps chaud semble modifier significativement la porosité comparativement aux matériaux conservés entièrement dans l'eau à 20°C.
- Le rapport E/L influe significativement sur la variation de l'absorption d'eau.

Chapitre 7:

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse s'est déroulé sur une période de quatre ans, s'est intégré dans l'activité de recherche du laboratoire de Géomatériaux de l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef et du laboratoire de Génie civil de l'Université de Reims Champagne Ardenne.

Le premier chapitre est un état de l'art consacré aux différentes méthodes et approches de formulations des bétons autoplaçants et aux différents essais de caractérisations des BAPs à l'état frais. Tandis que, dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur le climat chaud et ses effets sur le comportement des BAPs à l'état frais et durcis. Nous avons constaté que le comportement du béton ou du mortier dans des environnements simulant ceux de conditions du site des régions chaudes d'Algérie n'ont pas été étudiées en profondeur par les chercheurs. La plupart des recherches actuelles portent sur quelques environnements contrôlés.

Sous la lumière des résultats des essais réalisés dans cette étude, d'une part, il a été constaté qu'une perte d'étalement pour les six BAPs avec le temps de malaxage. D'autre part, nous remarquons, également, qu'après 30min pratiquement tous les BAPs perdent leur caractère autoplaçance. De même il apparaît que la perte d'étalement est moins prononcé pour les BAPs confectionnés le ciment CEMII-A-P. Cela peut être attribué à la grande surface spécifique Blaine du ciment CEMII-A-P par rapport à celle du ciment CEMII-A-C. En outre, à 45 minutes, nous n'avons pas d'enregistrement concernant le temps T_{500} , parce que l'étalement à 45 minutes est inférieur à 500mm.

Cependant, le temps V-Funnel augmente avec l'effet combiné du temps de malaxage et la température. En outre, le temps d'écoulement V-Funnel diminué avec l'augmentation du rapport E/L est ceci quelque soit le temps de malaxage. Des Corrélations existent entre les grandeurs de caractérisation de BAP et les grandeurs rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) mesurés par des expressions empiriques.

La résistance à la compression est fortement influencée par les méthodes de cure, sept jours de cure dans l'eau puis suivi d'un murissement dans un climat chaud était la durée optimale pour le développement d'une meilleure résistance à la compression est ceci quelque soit le type de liant et le rapport E/L.

La résistance à la compression peut être estimée par l'utilisation des techniques non destructives : la vitesse ultrasonique (UPV) et l'indice de rebondissement (IR). Cependant, il existe de très bonnes corrélations, entre UPV et la résistance à la compression d'une part et entre IR et la résistance à la compression d'autre part.

Nous avons observé que, indépendamment des rapports E/L et du type de ciment, le coefficient d'absorption des éprouvettes conservées dans le climat chaud (CC) est supérieur à celle des autres milieux de conservation. On constate, aussi, que les valeurs des coefficients de Sorptivité (S) du ciment au calcaire (CEMII-A-C) sont inférieures aux valeurs de (S) du ciment à la pouzzolane (CEMII-A-P), et ceci quelque soit rapport E/L et le mode de cure.

Des relations de corrélations exponentielles entre la Sorptivité et la résistance à la compression à 90 jours ont été trouvées. Les éprouvettes de BAP conservées dans l'eau présentent des valeurs de porosité à 28 jours inférieures à celles conservées dans les autres modes de cure. Le bétonnage par temps chaud semble modifier significativement la porosité comparativement aux matériaux conservés entièrement dans l'eau à 20°C.

Avec une augmentation de superplastifiant, les bétons fillérisés gâchés à température élevée présentent une diminution de la porosité. Le rapport E/L a une influence significative sur la variation de l'absorption d'eau. Le bétonnage par temps chaud semble modifier de manière légère l'absorption des BAPs dont le rapport E/L est élevé.

Ce travail de thèse nous a permis de progresser sur la connaissance du comportement des BAP par temps chaud. Pour autant, dans la progression, de nombreuses questions se posent concernant :

- l'impact du maintien d'ouvrabilité dans des périodes plus importantes (simulation d'agitation continue jusqu'à la livraison) sur les propriétés du matériau à l'état durci ;
- la cinétique d'hydratation d'autre type de liant en utilisant des méthodes d'analyse thermique (ATG-ATD).
- Prédiction des résistances mécaniques des BAP par temps chaud en utilisant des essais non destructifs (UPV).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- ACI 305 (1991).** *Hot Weather Concreting.* Journal of American Concrete Institute, vol. 88, 4, pp. 417-436.
- ACI 305 (2010).** *Guide to Hot Weather Concreting.* Reported by ACI Committee 305 of American Concrete Institute, 28p.
- Adjoudj M., Ezziane K., Kadri E. H., Ngo T. T., Kaci A. (2014).** *Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer.* Construction and Building Materials, vol. 70, pp. 549-559.
- Ait-Aider H., Hannachi N. E., Mouret M. (2007).** *Importance of W/ C ratio on compressive strength of concrete in hot climate conditions.* Building and Environment, Vol. 42, Issue 6, pp. 2461-2465.
- Alamiri Abdulla M. (1988).** *Influence of curing on the properties of concretes and mortars in hot climates,* Department of Civil Engineering Phd The University of Leeds P.252.
- 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>
- Al-Martini S. Nehdi M. (2016).** *Effects of heat and mixing time on self-compacting concrete.* Construction Materials. 163, pp. 175-182.
- Almusallam A. A. (2001).** *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars.* Constr. and Building Mat., 15, 361-368.
- Alshamsi Abdullah M., Imran Hassan D.A. (2002).** *Development of a permeability apparatus for concrete and mortar.* Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 6, pp. 923-929.
- Aïssoun B. Khayat K. Gallias J.-L. (2016).** *Variations of sorptivity with rheological properties of concrete coverin self-consolidating concrete.* Construction and Building Materials, pp. 113-120.
- Amziane S. (2005).** *Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais.* Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud.
- Anuj M. M., Supratic G. (2015).** *Rheology of Self Compacting concrete with Marble Powder mixes in comparison to Fly ash and Sand Based Mixes.* Source: [file:///C:/Users/MOI/Downloads/k2015_gupta%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/MOI/Downloads/k2015_gupta%20(1).pdf)
- AFGC (Association Française de Génie Civil) (2000).** *Bétons autoplaçants.* Recommandations provisoires.
- AFGC (2002).** *Béton fibrés à ultra-haute performance : recommandations provisoires.*

- Assié S. (2004).** *Durabilité des bétons autoplaçants*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, INSA, pp 190.
- ASTM C 469 (1994).** *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. Annual book of ASTM standards.
- ASTM C 469 (2002).** *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. Annual book of ASTM standards, 4.
- ASTM C 267-97 (1997).** *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, West Conshohocken.
- Audenaert K., Yuan Q., De Schutter G. (2010).** *On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete*. Construction and Building Materials, 24(3), 396-402.
- Aye Monn Sheinn (2007).** *Rheological Modelling of Self-Compacting Concrete*. Thèse de doctorat. Department Of Civil Engineering National University Of Singapore 231p.
- Balayssac JP., Senso (2008).** *A French project for the evaluation of concrete structures by combining nondestructive methods*. In: Sacomatis, RILEM conf, Varenna.
- Bakker R. F. M. (1983).** Permeability of blended cements concretes, 111t International conference on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by products in concrete. Montebello, Canada, ACI sp 79, pp 589-605.
- Banfill P.F.G. (1991).** *Rheology of fresh cement and concrete, chapter of interaction between sulfate and C₃A in cement paste rheology*. Published by Taylor and Francis, p. 47-56.
- Baroghel-Bouny V. (1994).** *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp 230.
- Belaidi A.S.E., Azzouz L., Kadri E., Kenai S. (2012).** *Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, vol. 31, pp. 251-257.
- Berhane Z. (1992a).** *The behaviour of concrete in hot climates*. Materials and Structures, 25(3), 157-162.
- Berhane Z. (1992b).** *Effect of Evaporation of Water from Fresh Concrete in Hot Climates on the Properties of Concrete*. Proc. of the third Int. Rilem Conf. on Concrete in Hot Climates, Torquay, edited by M. J. Walker, E&FN Spon, pp. 81-88.
- Billberg P. (2001).** *Influence of filler characteristics on SCC*, Proceedings of the first international RILEM symposium of self-compacting concrete, RILEM, Cachan Cedex 199 PP.
- Billberg P. (1999).** *Self compacting concrete for civil engineering structures – The Swedish experience*. CBI report 2:99. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

- Breyse D., Felicetti R., Krause M., Lataste, J., Moczko A. (2009).** *How to improve the quality of concrete assessment by combining several NDT measurements.* Non-destructive testing in civil engineering.
- Breyse D., Larget M., Sbartai ZM., Lataste JF., Balayssac JP. (2011).** *Quality of NDT measurements and accuracy of concrete physical properties quantitative assessment.* Eur J Environ Civ Eng;15(4):619–32.
- Breyse D. (2012).** *Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods.* Constr. Build. Mater., 33, 139-163.
- Bonavetti V., Donza H., Rahhal V., Irassar E. (2000).** *Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement.* Cement and Concrete Research 30 (2000) 703–708
- Bonavetti V. L., Rahhal V. F., Irassar E. F. (2001).** *Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements.* Cement and Concrete Research, 31(6), 853-859.
- Bosiljkov V.B. (2003).** *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler.* Cement and Concrete Research 33, p1279-1286.
- Bouikni A., R.N. Swamyb, Bali A. (2009).** *Durability of Concrete Containing 50% and 65% Slag.* Construction and Building Materials,23, 2836–2845.
- Bouzoubaa N., Lachemi M. (2001).** *Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results.* Cement and concrete research 31 (3), 413-420.
- Buil M., Ollivier J. P. (1992).** *Conception des bétons : la structure poreuse. La Durabilité des Bétons,* Presses de l'École Nationale de Ponts et Chaussées, Paris, 63-81.
- Bungey J.H., Millard S.G., Grantham M.G. (2006).** *Testing of concrete in structures.* 4th edition.
- Bui V. K., Akkaya Y., Shah S. P. (2002).** *Rheological model for self-consolidating concrete.* ACI Materials Journal, 99(6), 549-559.
- Bur N., Roux S., Géraud Y., Feugeas F. (2010a).** *Pore structure of mortar: influence of cement base and curing.* European journal of environmental and civil engineering, 15 (5), 699- 714.
- Canan T. (2003).** *Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete.* Cement and Concrete Research, vol. 33, pp. 1637–1642.
- Charbel A. (2008).** *Effet couplé de la formulation et du mûrissement sur les caractéristiques du béton autoplaçant à haute performance dans les conditions estivales.* Maitrise en science appliquée, Université de Sherbrooke, Canada.
- Chen J. J., Kwan A. K. H., an Jiang Y. (2014).** *Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete.* Construction and Building Materials, 56, 87-93.

- Clergue C., Ussigh F., Fontaine J., Hu C., Jaffre Y., Laplante P., Sedran T. (2000).** *Betons auto-plaçants: recommandations provisoires.*
- De Larrard F., Ferraris C. F. (1998).** *Rhéologie du béton frais remanié. II: relations entre composition et paramètres rhéologiques.* Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 214, pp 69-79.
- De Larrard F., Sedran T. (1999).** *Une nouvelle approche de la formulation des bétons.* In Annales du BTP (Vol. 6, pp. 39-54).
- De Larrard F. (1999).** *Concrete mixture-proportioning - A scientific approach,* Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON.
- Demirboga R., Türkmen I., Karako M.B.(2004).** *Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral admixed concrete.* Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 12, pp. 2329–2336. 2004.
- Dinakar P., Kartik R. M., Sharma M. (2013).** *Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash.* Vol. 46, pp. 609-616.
- Domone P. (2006).** *Self-Compacting Concrete: An Analysis of 11 Years of Case Studies.* Cement and Concrete Composites 28 (2): 197–208.
- Domone P. L. (2007).** *A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self Compacting Concrete.* Cement and Concrete Composites Volume 29, Issue 1, Pages 1-12.
- El Hilali Abdellah (2009).** *Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fines calcaire et des fibres végétales.* Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, pp 183.
- EFNARC (2005).** *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use,* The Self-Compacting Concrete European Project Group.
- EN 197-1 (2001).** *Ciment - Partie I: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.*
- Escadeillas G. (1988).** *Les ciments aux fillers calcaires : Contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillerisés.* Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse.
- Feidman R.F. (2005).** *Essais non destructifs du béton.* CBD-187-F, 6p.
- Ferhat Bingöl A. Tohumcu Ilhan (2013).** *Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume.* Materials and design vol.51 pp. 12-18.
- Felekolu B., Türkel S., Baradan B. (2007).** *Effect of Water/Cement Ratio on the Fresh and Hardened Properties of Self-compacting Concrete.* Building and Environment, 42: 1795-1802.
- Javier C., Dale B., Jason W. (2011).** *Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete.* Cement & Concrete Composites. 33, 805-813.

- Gagne R., Aïtcin P. C. (1993).** *Superplasticizers for durable concrete*. Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton. Monterrey, Octobre, Mexique, pp. 200-217.
- Gao X., Giorgi F. (2008).** *Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model*. *Global and Planetary Change*, 62(3), 195-209
- Gao X., Pal J. S., Giorgi F. (2006).** *Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation*. *Geophysical Research Letters*, 33(3).
- Gesoğlu M., Güneyisi E., Özbay E. (2009).** *Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume*. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1847-1854.
- Ghafoori N., Diawara H.(2010).** *Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete*. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 946-955.
- Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M. (2007).** *Mechanical Properties and Durability of Mortar and Concrete Containing Natural Pozzolana and Limestone Blended Cements*. *Cement & Concrete Composites*.vol 29, (7) pp. 542-549.
- Gibbs J.C., Zhu W. (1999).** *Strength of hardened self-compacting concrete*. *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 September 1999.
- Golaszewski J., Szwabowski J. (2004).** *Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars*. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 235-248.
- Golaszewski J. (2012).** *Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance*. *Construction and Building Materials*, 35, 586-596.
- Goto S., Roy D.(1981).** *The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, vol. 11, pp 575-579.
- Hall C. (1989).** *Water sorptivity of mortars and concretes: a review*. *Mag. Concr. Res.* 41 (147) 51-61.
- Hans-Wolf Reinhardt, Michael Stegmaier (2006).** *Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC)*. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 879 – 885.
- Hirsch C.M. (2005).** *Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmitteln und Zementen bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation*. *Thèse de Doctorat*, Technischen Universität, München, 200 pp.
- Holschemacher K. (2010).** *Hardened material properties of self-compacting concrete*. *Journal of Civil Engineering and Management*. 10(4), pp. 261-266.
- Huang N. (2006).** *Rhéologie des pâtes granulaires*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, pp 204.

- Jacobs F., Hunkeler F. (1999).** *Design of self compacting concrete for durable concrete structure*. Proceeding of first international symposium on self compacting concrete, (Pro 7), stockholm, Suede, pp. 394-407.
- Josserand L. (2002).** *Ressuage des bétons hydrauliques*. Thèse de doctorat, Ecole des Ponts Paris Tech, pp.
- Kakali G., Tsivilis S., Aggeli E., Bati M. (2000).** *Hydration products of C₃A, C₃S and Portland cement in the presence of CaCO₃*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, Issue 7, pp. 1073-1077.
- Kanellopoulos A., Petrou, M. F., Ioannou I. (2012).** *Durability performance of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 37, 320-325.
- Kazim T., Sinan C., Salih Y. (2007).** *Capillary water absorption of self-compacting concrete under different curing conditions*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences Vol. 14, pp. 365-372.
- Khan A. A. (2002).** *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 242 p.
- Khatib J. M. (2008).** *Performance of self-compacting concrete containing fly ash*. Construction and Building Materials, 22(9), 1963-1971.
- Khayat K. H., Pierre-Claude (1992).** *Silica Fume in Concrete--An Overview*. American concrete institute. Vol 32. 835-872.
- Khayat K. H., Guizani Z. (1997).** *Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete*. Materials Journal, 94(4), 332-340.
- Khayat K. H. (1998).** *Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials—an overview*. Cement and Concrete Composites, 20(2-3), 171-188.
- Khayat K. H., Omran A. F. (2011).** *Field validation of SCC formwork pressure prediction models*. Concrete international vol. 33 n°6, pp 33-39.
- Khelifa R., Rahim N., Sekiou S. (2002).** *L'impact des cimenteries sur l' environnement—Cas de la cimenterie de Ain-Touta*. Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans.
- Klug, Y., Holschemacher K. (2003).** *Material properties of hardened self-compacting concrete*. In Proceedings of the International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium a New Era of Building, Cairo, Egypt (Vol. 18, p. 20).
- Kolani B. (2012).** *Comportement au jeune âge des structures en béton armé à base de liants composés aux laitiers*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, pp.
- Kurokawa Y., Tanigawa Y. (1994).** *A Study on The Slump Test and Slump - Flow test of Fresh Concrete*. Transactions of the Japan Concrete Institute Vol. 16. PP. 25-32.
- Lawrence P. (2000).** *Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, pp 220.

- Leemann A., Loser R., Münch B. (2010).** *Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete.* Cement Concrete Compos., 32(2), 116-120.
- Leung H. Y., Kim J., Nadeem A., Jaganathan J., Anwar M. P. (2016).** *Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume.* Construction and Building Materials, 113, 369-375.
- Madandoust R., Mousavi S. Y. (2012).** *Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin.* Construction and building materials, 35, 752-760.
- Mamillan Minard, Zanghellini. (1989).** *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.
- Martys N. S., Ferraris C. F. (1997).** *Capillary transport in mortars and concrete.* Cement and Concrete Research, 27(5), 747-760.
- Mechaymech A. (2010).** *Effets des viscosants sur la rhéologie et la stabilité des systèmes cimentaires fluides.* Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, pp 217.
- Mehmet D., Karaoglu M.H., Alkan M. (2009).** *Adsorption kinetics of maxilon yellow 4GL and maxilon red GRL dyes on kaolinite.* J. Hazard. Mater. 165, 1142–1151
- Mehta P. K. (1986).** *Concrete structure. properties and materials.*
- Mindess S. (1983).** *Mechanical Performance of Cementitious Systems. Structure and Performance of Cements,* Applied Science Publishers, Essex.
- Mindess S., Young J. F. (1981).** *Concrete.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, N J.
- Mohamed H. A. (2011).** *Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions.* Ain Shams Engineering Journal, 2(2), 79-86.
- Monteiro P.J. M., Mahta P. K. (1986b).** *Interaction between carbonate rock and cement paste,* Cement concrete researsh vol.16, No 2, pp. 127-134.
- Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G. (2005).** *Strength impairment of concrete mixed in hot weather: analysis in relation to physical and chemical properties of hardened concrete.* Magazine of Concrete Research, 57(5), 301-308.
- Mouret M. (1997).** *Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud.* Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, pp.
- Mucteba Uysal Mansur Sumer (2011).** *Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures.* Construction and Building Materials vol.25, pp. 4112–4120.
- Nagaratnam B. H., Faheem A., Rahman E. M., Abdu M. M. I, Leblouba M.(2015).** *Mechanical and Durability Properties of Medium Strength Self-Compacting Concrete with High-Volume Fly Ash and Blended Aggregates.* Periodica Polytechnica Civil Engineering. 59(2), pp. 155–164.

- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., De Vries B., Fenhann J., Gaffin S., La Rovere E. L. (2000).** *Special report on emissions scenarios, working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, 595pp. ISBN 0, 521(80493).
- Nasir M., Al-Amoudi O.S.B., Al-Gahtani H.J., Maslehuddin M. (2016).** *Effect of casting temperature on strength and density of plain and blended cement concretes prepared and cured under hot weather conditions*. *Constr. Build. Mater.*, **112**, 529-537.
- Nehdi M., Pardhan M., Koshowski S. (2004).** *Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements*. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2103-2112.
- Nehdi, M., Rahman M. A. (2004).** *Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction*. *Cement and concrete research*, 34(11), 1993-2007.
- Neville A. M. (1983).** *Properties of concrete*. 3rd edition, Pitman publishing Inc, published in 1981 and reprinted in 1983.
- NF P18-508 (1995).** *Norme Française NF P 18-508. Additions pour béton hydraulique, additions calcaires: Spécifications et critère de conformités*.
- NF EN 12504-2 (2003).** *Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement*. AFNOR.
- NF EN 12390-3 (2003).** *Norme Française NF P 18-455. Partie 3 - Résistance à la compression des éprouvettes*.
- NF EN 206-9 (2010).** *Béton, Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant*.
- New M., Hulme M., Jones P. (2000).** *Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate*. *Journal of climate*, 13(13), 2217-2238.
- Nicolas Bur (2012).** *Etudes des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg 179 pp.
- Nicolas E. (2010).** *Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants*. Thèse de Doctorat, université de Henri Poincaré Luxembourg, 180 pp.
- Qasrawi H. Y. (2000).** *Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted*. *Cement and concrete research*, 30(5), 739-746.
- Ouchi M., Hibino M., Okamura H. (1997).** *Effect of superplasticizer on self-compactability of fresh concrete*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1574), 37-40.
- Okamura H., Ozawa K. (1994).** *Self-compactable high performance concrete*. International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44.

- Okamura H., Ozawa K. (1995).** *Mix design for self-compacting concrete.* Concrete library of JSCE, N°: 25.
- Ouchi M., Hibino M., Okamura H. (1997).** *Effect of superplasticizer on self-compactability of fresh concrete.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1574), 37-40.
- Ozawa K., Maekawa K., Okamura, H. (1990).** *High performance concrete with high filling capacity.* In *Admixtures for Concrete-Improvement of Properties: Proceedings of the International RILEM Symposium (Vol. 5, p. 60).*
- Ozawa K., Tangtermsirikul S., Maekawa K. (1992).** *Role of powder materials on filling capacity of fresh concrete.* Proceedings of the 4th CANMET/A I Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concr , Istanbul, Turquie, pp. 121-137.
- Petit J. Y., Khayat K. H., Wirquin E. (2006).** *Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar.* Cement and Concrete Research, 36(5), 832-841.
- Petit J. Y., Khayat K. H., Wirquin E. (2008).** *Methodology to evaluate the coupled influence of time and temperature on rheological properties of cement-based materials.* Submitted for publication to ACI material journal.
- Petersson O., Skarendahl A. (Eds.) (2000).** *Self-compacting Concrete: State-of-the-art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete.* RILEM publications.
- Péra J., Husson S., Guilhot B. (1999).** *Influence of finely ground limestone on cement hydration.* Cement and Concrete Composites, 21(2), 99-105.
- Persson B. (2000).** *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete.* Cement and Concrete Research, 31, pp.193-198.
- Persson B. (2001).** *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete.* Cement and Concrete Research, Vol. 31, no 2 :193-198.
- Pons G., Proust E., Assie S. (2003).** *Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?.* Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645.
- Poppe A. M., De Schutter G. (2001).** *Influence of the Nature and the Grading Curve of the Powder on the Rheology of Self-Compacting Concrete.* Special Publication, 200, 399-414.
- Price W. H. (1951).** *Factors influencing concrete strength.* In Journal Proceedings (Vol. 47, No. 2, pp. 417-432).
- Rahmat M., Malek M. R., Mousavi S.Y. (2011).** *An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene.* Construction and Building Materials. Vol. 25, Issue 9, Pages 3721-3731.

- Rajagopalan P.R., Prakash J., Naramimhan V. (1973).** *Correlation between ultrasonic pulse velocity and strength of concrete.* Indian Concrete Journal. Vol. 47, No. 11, pp.416–418.
- Razak H. A., Chai H. K., Wong H. S. (2004).** *Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials.* Cement and concrete composites, 26(7), 883-889.
- Reinhardt H. W., Stegmaier M. (2006).** *Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC).* Cement and Concrete Research, 36(5), 879-885.
- Richet C., Ayache R., (1996).** *Solubilité, diffusion et sorption des émetteurs α et β γ dans les liants hydrauliques.* NT SESD-CEA.
- RILEM (2001).** *International Rilem Symposium on connection between steel and concrete,* stuttgart, Garmanay.
- Lina Rojas-Henao, Fernández-Gómez J., López-Agüí J.C. (2012).** *Rebound hammer, pulse velocity, and core tests in self-consolidating concrete.* ACI Mater. J., 109(2), 235-243.
- Roziere E. (2007).** *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle.* Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, pp 201.
- Şahmaran M., Christianto H. A., Yaman İ. Ö. (2006).** *The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars.* Cement and concrete composites, 28(5), 432-440.
- Salhi M. (2012).** *Etude des caractéristiques mécaniques d'un béton conservé dans l'eau de mer : Essais accélérés.* Mémoire de magister, ENSET d'Oran, pp 116.
- Salhi M., Ghrici M., Alex Li, Bilir T. (2017).** *Effect of curing treatments on the material properties of hardened self-compacting concrete.* Advances in Concrete Construction, 5(4), 359-375.
- Sawicz Z., Heng S. S. (1996).** *Durability of concrete with addition of limestone powder.* Magazine of Concrete Research, 48, No. 175, pp. 131-137.
- Sedran T.(1995).** *Les bétons autonivelants (BAN). Synthèse bibliographique.* Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°196, pp 53-60.
- Sedran T., De Larrard F., Hourst F., Contamines, C. (1996).** *Mix Design of Self-Compacting Concrete.* Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, 439-450.
- Sedran T. (1999).** *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp193.
- Sheinn A. M. M., Ho D. W. S., Tam C. T. (2002).** *Rheological model for self compacting concrete- paste rheology.* in C.T.Tam (Ed) Proceedings of the 27th Conference on Our World in Concrete and Structures , Singapoure, CI-Premier , Singapour , pp, 517-523

- Shindoh T., Matsuoka Y. (2003).** *Development of combination-type self-compacting concrete and evaluation test methods.* Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 26-36.
- Shirley, D.E. (1980).** *Concreting in Hot Weather*, 4th Edition, British Cement Association.
- Siad H., Mesbah. H. A., Mouli M., Escadeillas G. Khelafi H. (2014).** *Influence of Mineral Admixtures on the Permeation Properties of Self-Compacting Concrete at Different Ages.* Arab. J. Sci. Eng. 39: pp. 3641–3649.
- Skanska (1981).** *Concrete in hot countries.* International seminar Arranged by Skanska, Helsingor.
- Skarendahl A., Petersson Ö. (2000).** *State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, self-compacting concrete.* SARL, Paris: RILEM Publ, 17-22.
- Somot S., Sevault F., Déqué M., Crépon, M. (2008).** *21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model.* Global and Planetary Change, 63(2), 112-126.
- Sonebi M., Bartos P.J.M.(1999).** *Hardened SCC and its bond with reinforcement. Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, Sweden 13-14 September pp. 275-289.*
- Tasdemir C. (2003).** *Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete.* Cement and concrete research, 33(10), 1637-1642.
- Tattersall G.H., Banfill P.F.G.(1983).** *The Rheology of Fresh Concrete.* Pitman, pp.254-305.
- Topcu I. B., Bilir T., Uygunoğlu T. (2009).** *Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete.* Construction and Building Materials, 23(5), 1947-1953.
- Trtnik G., Kavcic F., Turk G. (2009).** *Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks.* Ultrasonics 49, 53-60.
- Turcry P. (2003).** *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation.* Thèse de doctorat, Université de Nantes, pp 214.
- Ulucan Z.Ç., Türk K., Karataş M. (2008).** *Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete.* Russ. J. Nondestruct. Test., 44(5), 367-374.
- Vint-An LE (2014).** *Comportement des bétons autoplaçants par temps chaud.* Thèse de Doctorat Université de Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Wainwright P. J. (1986).** *Cement replacement materials.* Edited by R. N. Swamy, vol.3, Surry University Press, 1986, chapter 4.
- Wallevik E., Nielsson I. (2003).** *Self-Compacting Concrete.* Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium. RILEM Publications, pp. 311-32.

- Weisheit S., Waldmann D., Greger M. (2010).** *Influence of environmental conditions for the rheological properties of SCC.* Source: <https://orbi.lu.uni.lu/bitstream/10993/23593/1/MS-096.pdf>
- Wongkeo W., Thongsanitgarn P., Ngamjarurojanojana N., Chaipanich A. (2014).** *Compressive strength and chloride resistance of self compacting concrete containing high volume fly ash and silica fume.* *Materials and design.* 64: 261-269.
- Yahia A., Khayat H.K., Sayed M. (2012).** *Statistical modelling of the coupled effect of mix design and rebar spacing on restricted flow characteristics of SCC.* *Construction and Building Materials* Volume 37, Pages 699-706.
- Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B., Kadri E.H. (2017).** *Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate.* *Advances in Concrete Construction*, Vol. 5, No. 3 (2017) 271-288.
- Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A. M., Taerwe, L. (2007).** *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes.* *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102.
- Zerbino R., Barraga B., Garcia T., Agullo L., Gettu R. (2009).** *Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete.* *Materials and Structures* 42:947–960.
- Zhao Hui, Sun Wei, Wu Xiaoming, Gao Bo (2012).** *Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete.* *Materials and design* 35, pp. 194-200.