

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

Faculté des Sciences et technologies

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER 2

Spécialité : Structures et matériaux

**EFFET DE LA CURE SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS
AUTOPLACANTS À BASE DE LAITIER**

Par

ROUIS NAIMA

Encadrée par :

GETTAF youssef

U.S.D.B

Président

DEBIEB Farid

U. Y.F.M

Examineur

KENAI Said

U. S.D.B

Rapporteur

YAHIAOUI walid

U. S.D.B

Co- Rapporteur

Blida, Juin 2015

Abstract

The self-compacting concrete (SCC) is certainly one of the most innovative materials used in construction today, because of its mobility, low permeability and homogeneity. This work is dedicated to the study of the influence of moist cure on the performance of SCC - based on El-Hadjar slag. The cement weight was replaced by slag at two different levels of substitution (15% and 25%). The specimens were stored in two different environments namely a standard environment ($T = 20 \text{ }^{\circ}$, $RH = 100\%$) and outdoor, inside of Blida laboratory, after an initial moist curing period of 3, 7 and 28 days.

Resistance to compression at 28 and 60 days, water permeability, ultrasound test hammer has been studied.

Experimental results show the importance of moist cure. A lack in cure results in insufficient moisturization of the superficial layer of concrete by lack of water, which increases the porosity. Reducing the curing time causes long-term negative consequences while prolonged moist cure limits the porosity of concrete especially when the blast furnace slag is used. The substitution of the cement by slag improves the durability SCC in the long term.

Keywords : Self-compacting concrete, slag, cure, compressive strength, ultrasound, sclerometer and water permeability.

Résumé

Le béton autoplaçant (BAP) est certainement l'un des matériaux les plus innovants utilisés aujourd'hui dans la construction, du fait de sa maniabilité, sa faible perméabilité, et son homogénéité. Ce travail est consacré à l'étude de l'influence de la cure humide sur les performances de BAP à base de du laitier d'El-Hadjar. Le ciment a été remplacé par du laitier en poids à deux niveaux différents de substitution (15 % et 25 %). Les éprouvettes ont été conservées dans deux environnements différents à savoir un environnement standard ($T = 20^{\circ}$, HR = 100 %) et en plein air à l'intérieur du laboratoire de Blida, après une période de cure humide initiale de 3, 7 et 28 jours.

La résistance à la compression à 28 et 60 jours, la perméabilité à l'eau, l'ultrason et le scléromètre ont été étudiés.

Les résultats expérimentaux montrent l'importance de la cure humide. Un manque de cure conduit à une hydratation insuffisante de la couche superficielle de béton par manque d'eau, ce qui augmente la porosité. La réduction du temps de cure provoque des conséquences néfastes à long terme alors qu'une cure humide prolongée limite la porosité des bétons en particulier lorsque le laitier de haut fourneau est utilisé. La substitution du ciment par du laitier améliore la durabilité des BAP à long terme.

Mots clés : Béton autoplaçant, laitier, cure, la résistance à la compression, l'ultrason, scléromètre et la perméabilité à l'eau.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي بالتأكيد واحدة من أكثر المواد المبتكرة المستخدمة في البناء اليوم، بسبب قدرتها الحركية، ضعف نفاذيتها وتجانسها.

يكرس هذا العمل لدراسة تأثير العلاج الرطب على أداء الخرسانة المرصوصة ذاتيا المكونة أساسا من خبث الحجار. تم استبدال الاسمنت بالخبث على مستويين مختلفين (15% و 25%). خزنت العينات في بيئتين مختلفتين وبالتحديد ببيئة قياسية (حرارة =20°، رطوبة =100%) وفي الهواء الطلق، داخل مختبر البلدية، بعد فترة علاج رطب أولية من 3 و 7 و 28 أيام.

في اليوم 28 واليوم 60 تمت دراسة المقاومة للضغط، نفاذية المياه، اختبار المطرقة، واختبار الموجات فوق الصوتية

تظهر النتائج التجريبية أهمية المعالجة الرطبة.

أي نقص في المعالجة الرطبة يؤدي إلى نقص في تمييه الطبقة العليا للخرسانة لنقص المياه مما يزيد في المسامية.

التقليل من مدة المعالجة الرطبة يسبب عواقب سلبية على طول المدى على خلاف إطالتها التي تؤدي إلى نقص في المسامية خاصة عند استخدام خبث الأفران العالية.

استبدال الإسمنت بالخبث يحسن متانة الخرسانة المرصوصة ذاتيا على المدى الطويل.

كلمات البحث : الخرسانة المرصوصة ذاتيا ،الخبث، العلاج الرطب، المقاومة للضغط ،الموجات فوق الصوتية،المطرقة و نفاذية المياه.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur de mémoire

Monsieur Kenai Said et à mon co-promoteur Monsieur Yahiaoui walid,

Je les remercie de m'avoir encadrée, orientée, aidée et conseillée.

Je remercie aussi, M. Kouider Djelloul Omar, M. Siahmed Mohamed, Mme

Hammat Sihemet et Mme Debbih Amina pour leur aide tout au long du projet

Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi,

Je remercie mon mari pour son aide et son soutien.

Je remercie très spécialement mes frères et sœurs pour leurs encouragements.

Enfin, je tiens à remercier toutes mes amies que j'aime tant

À toutes ces personnes, je présente mes remerciements et ma gratitude.

Table des matières

Résumé.....	2
Remerciements.....	4
Table des matières	5
Liste des figures	8
Liste des tableaux.....	12
Liste des symboles et des abréviations	13
INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L’EFFET DE LA CURE SUR LA PERFORMANCE DES BÉTONS AUTOPLACANTS	18
1.1 Généralités.....	18
1.2 La cure.....	18
1.3 Conditions climatiques.....	18
1.3.1 Temps chaud.....	19
1.3.2 Temps froid	21
1.3.3. Temps venteux.....	22
1.4 L’objectif de la cure	22
1.5 Les bénéfices de la cure sur les performances du béton	23
1.5.1 La fissuration	23
1.5.2. Conclusion.....	26
1.5.3. La durabilité.....	26
1.5.4 La résistance à la compression	32
1.5.5. Le fluage.....	45
1.5.6 Le développement durable	46
1.6. Impact de la cure sur les performances des BAP	47
1.6.1. Le béton autoplaçant.....	47
1.6.2. Principe et critère de formulation	47

1.6.3. Propriétés des bétons autoplacants à l'état frais	48
1.6.4. Influence de la cure sur les performances des BAP	52
1.7 Conclusion.....	60
CHAPITRE 2: MATÉRIAUX ET ESSAIS.....	62
2. 1. Introduction.....	62
2. 2 Matériaux utilisés	62
2.2.1 Ciment	62
2.2.2 Les Granulats.....	63
2.2.3 Le laitier.....	66
2.2.4 Les superplastifiants	69
2.2.5 L'eau de gâchage.....	70
2.3 Méthodes de caractérisation du BAP à l'état frais	70
2.3.1 Formulations adoptées.....	70
2.3.2 Formulation du mortier autoplaçant	71
2.3.3 Formulation de BAP :	74
2.4 Méthodes de caractérisation des BAP à l'état durci.....	81
2.4.1 Essai non destructif.....	81
2.5. Mode de cure.....	85
2.6 Les variables étudiées	86
CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	89
3.1 Introduction.....	89
3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant	89
3.2.1 Essai de mini cône	90
3.2.2 Essai de V-funnel	91
3.3 Effet du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais	92
3.3.1 Étalement et Temps T50 au cône d'Abrams	94
3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel.....	97

3.3.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai L-Box	98
3.3.4 Résistance à la ségrégation par tamisage.....	101
3.4 Effet de la cure sur le BAP à base du laitier à l'état durci	102
3.4.1 Essai d'ultrason	102
3.4.2 Essai de scléromètre	106
3.4.3 La résistance à la compression	109
3.4.4. La perméabilité à l'eau	112
3.5 Conclusion.....	115
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	117
RÉFÉRENCES BIBLIOGRQPHIE.....	120
Annexe A : Fiche technique « MEDAFLOW 30 »	136
Annexe B : Exemple de calcul de la composition du mortier	140
Annexe C : Exemple de calcul de la composition du béton	144

Liste des figures

figure 1.1: abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau a la surface du beton en fonction des conditions atmospheriques (temperature, humidite relative, vitesse du vent et temperature du beton) [6].	21
figure 1.2: évolution de la perte de masse : avec vent(a), et sans vent(b) [10].	22
figure 1.3: évolution de la resistance et le module d'elasticite pour un beton, comparee au temps de l'occurrence de fissures avec un test de retrait [15].	24
figure 1.4: representation de la resistivite du beton en fonction de la resistance pour les melanges contenant une variete de liants hydrauliques [28].	26
figure 1.5: l'effet de la cure humide dans le temps a differents niveaux de sorptivite [31].	28
figure 1.6: permeabilite a l'air du beton en fonction du rapport e/c et de la duree de la cure humide [35].	29
figure 1.7: permeabilite a l'oxygene des betons fabriques avec et sans ajouts [36].	30
figure 1.8: permeabilite des ions chlores en fonction du rapport e/c et de la longueur de la cure humide [37].	30
figure 1.9: distribution de la taille des pores dans le beton (age 12 mois, e/c = 0,43) [50].	31
figure 1.10: influence des cendres volantes et du laitier sur l'evolution de la structure poreuse des pates de ciment au cours du temps [108].	32
figure 1.11: la resistance a la compression en fonction de temps de la cure pour les petits echantillons [53].	33
figure 1.12: l'effet de la cure lors des tests de compression en fonction de l'augmentation de taille de l'échantillon [52].	33
figure 1.13: developpement de la resistance a la compression du beton dans la cure humide [54].	34
figure 1.14: developpement de la resistance a la compression du beton conservee dans une chambre climatique apres demoulage [54].	34
figure 1.15: developpement de la resistance a la compression du beton conservee dans une chambre climatique apres deux jours de cure humide [54].	35
figure 1.16: developpement de la resistance a la compression du beton conserve a une temperature de 38 °c et 65 % d'humidite [54].	35
figure 1.17: effet du degre de saturation sur la resistance a la compression et a la traction a 28 jours [55].	36

figure 1.18: influence des methodes de cure sur la resistance f_c , des eprouvettes conservees a l'air libre [56].	37
figure 1.19: influence des methodes de cure sur la resistance f_t , des eprouvettes conservees a l'air libre [56].	37
figure 1.20: effet de la periode de cure sur la resistance a la compression du beton, cure a l'eau a l'interieur du laboratoire, cure en dehors de la toile de jute [58].	38
figure 1.21: effet de la cure humide sur l'evolution de la resistance [61].	39
figure 1.22 : donnees indiquant une augmentation significative dans la penetration du chlorure avec une mauvaise cure [62].	39
figure 1.23: vue en coupe schematique du marteau de rebondissement de schmidt n [96].	42
figure 1.24: marteau de rebondissement de schmidt type n.	42
figure 1.25: appareil de mesure de la vitesse d'impulsion [101].	44
figure 1.26: diagramme schematique du circuit d'essai de vitesse de l'impulsion [101].	44
figure 1.27: configurations des transducteurs pour la mesure de la vitesse ultrasonique.	45
figure 1.28: representation du developpement durable de « triple bottom line » [64].	46
figure 1.29: concept de formulation des bap [70].	48
figure 1.30: essai d'etalemt au cone (slump flow) [76].	50
figure 1.31: essai de la boite en l [76].	51
figure 1.32: schematisation de l'essai de l'entonnoir (v funnel) [76].	51
figure 1.33: schematisation de l'essai de stabilite au tamis [76].	52
figure 1.34: influence des temperatures chaudes et froides sur etalemt des bap [71].	53
figure 1.35: evolution de la resistance a la compression a differentes cures [80].	54
figure 1.36: resistance a la compression de type i: (a) dosage en ciment = 550 kg/m ³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m ³ [79].	55
figure 1.37: resistance a la compression de type ii : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m ³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m ³ [79].	55
figure 1.38 : effet de condition de cure sur la resistance a la compression pour le type i : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m ³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m ³ [79].	55
figure 1.39: effet de condition de cure sur la resistance a la compression pour le type ii : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m ³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m ³ [79].	56
figure 1.40: resistance a la compression des eprouvettes du beton selon le pourcentage d'epa et les conditions de cure [74].	56

figure 1.41: developpement de la resistance a la compression des bap, dont la cure initiale dans l'eau et dans de differentes conditions de cure [83].	57
figure 1.42: resistance a la compression du beton ordinaire et bap pour les differentes methodes de cure (a) eau (b) couvert et (c) air [84].	57
figure 1.43: influence de la temperature de cure sur l'evolution de la resistance d'un beton au jeune age et a 28 jours [104].	58
figure 1.44: permeabilite a l'eau [86].	59
figure 1.45: coefficient de permeabilite en fonction de la temperature, pendant 1 h et 48h [105].	60
figure 2.1: ciment du type cem ii/a-l 42.5.	63
figure 2.2: sable de baghlia (a), sable de boughezoul (b).	64
figure 2.3: gravier 8/15 (a) et 3/8 (b) de setif.	65
figure 2.5: tamiseuse a vibrations de laboratoire.	65
figure 2.4: courbe granulometrique du sable et gravier naturel.	66
figure 2.6 : : laitier granule de haut fourneau utilise (a) avant broyage, (b) apres broyage.	67
figure 2.7 : broyeur a boulets utilise.	67
figure 2.8 : modes d'action des superplastifiants — defloculation des grains de ciment.	69
figure 2.9: sequence de malaxage du mortier [72].	71
figure 2.10: le malaxeur a mortier de 5 litres de capacite.	72
figure 2.11: l'entonnoir en v (v- funnel test) pour mortier.	72
figure 2.12: essai d'etalemt de mini cone de mortier.	73
figure 2.13: sequence du malaxage du beton.	75
figure 2.14 : le malaxeur a beton de 40 litres de capacite.	75
figure 2.15: essai d'etalemt au cone d'abrams et principe de la mesure de l'etalemt.	76
figure 2.16: essai v-funnel.	78
figure 2.17: la boite en « l ».	78
figure 2.18: essai de la boite en « l ».	79
figure 2.19: mesure de h1 et h2.	79
figure 2.20: essai de stabilite au tamis.	80
figure 2.21: ponçage des eprouvettes a l'aide de la pierre abrasive.	81
figure 2.22: appareil de l'ultrason utilise.	82
figure 2.23: étalonnage a l'aide du barreau de calibrage(a), graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline(b), mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores(c).	82

figure 2.24 : appareil du sclerometre utilise(a), et mesure de l'indice de rebondissement par le sclerometre(b).	83
figure 2.25: la presse de capacite de 3000 kn pour l'essai de compression simple.	83
figure 2.26: essai de permeabilite a l'eau.	84
figure 2.27: essai bresilien.	84
figure 2.28: mesure de la profondeur de penetration d'eau.	85
figure 2.29 : éprouvettes conservees dans l'eau douce et a l'air libre.	85
figure 2.30 : diagramme des differents essais.....	87
figure 3.1 : l'etatement de mortier pour le dosage en sp = 1.6 % et 1.8 %.	90
figure 3.2: valeurs d'etatement en fonction du dosage en superplastifiant.....	91
figure 3.3: temps d'ecoulement en fonction du dosage en superplastifiant.....	92
figure 3.4: étalement et temps d'écoulement t50 en fonction de la teneur en laitier.	95
figure 3.5: tv-funnel en fonction de la teneur en laitier.	98
figure 3.6: rapport h2/h1 en fonction de la teneur en laitier.	99
figure 3.7: temps d'écoulement t20 et t40 en fonction de la teneur en laitier.	101
figure 3.8: resistance a la segregation par tamisage en fonction de la teneur en laitier.....	102
figure 3.9: correlation entre la resistance a la compression et la vitesse ultrasonique en fonction de la teneur en laitier et la duree de cure a l'age de 28 jours.	105
figure 3.10 : correlation entre la resistance a la compression et la vitesse ultrasonique en fonction de la teneur en laitier et la duree de cure a l'age de 60 jours.	105
figure 3.11: effet de la duree de cure sur la vitesse ultrasonique a 28 et 60 jours des bap a base de laitier.	106
figure 3.12 : correlation entre la resistance a la compression et l'indice de rebondissement en fonction de la teneur en laitier et la duree de cure.	107
figure 3.13: effet de la duree de cure sur l'evolution de la resistance en compression a 28 jours des bap a base de laitier.	111
figure 3.14: effet de la duree de cure sur l'evolution de la resistance en compression a 60 jours des bap a base de laitier.	111
figure 3.15: effet de la duree de cure sur la profondeur de penetration d'eau des bap a base de laitier.	113
figure 3.16: effet de la duree de cure sur les differences masse avant et apres la mesure de la permeabilite a l'eau des bap a base de laitier.	114

Liste des tableaux

tableau 1.1: la composition chimique principale moyenne d'un laitier [22].	31
tableau 1.2: differents modeles de sclerometre [96].	41
tableau 1.3: relation generale entre la qualite du beton et la vitesse d'impulsion [90].	43
tableau 1.4: la resistance et les caracteristiques physiques de slwc [104].	59
tableau 2.1: caracteristiques chimiques et mineralogiques du ciment.	62
tableau 2.2: caracteristiques physiques et mecaniques du ciment.	63
tableau 2.3 : caracteristiques physiques et mecaniques du sable corrige.	64
tableau 2.4: caracteristiques physiques de gravier.	65
tableau 2.5: module de finesse du sable corrige.	66
tableau 2.6 : l'analyse chimique de laitier d'el hadjar	68
tableau 2.7 : indice d'activite hydraulique du laitier granule [109].	69
tableau 2.8: quelques caracteristiques de medaflow 30.	70
tableau 2.9: classes des bap selon l'etatement et le domaine d'utilisation [113].	77
tableau 2.10: critere de stabilite [113].	80
tableau 3.1: composition des mortiers pour differentes valeurs de sp/l.	90
tableau 3.2: valeurs d'etatement en fonction du dosage en superplastifiant.	90
tableau 3.3: valeur de temps d'ecoulement en fonction du dosage en superplastifiant.	91
tableau 3.4 : composition des bap testes.	93
tableau 3.5: valeurs recommandees pour les essais du bap [118].	93
tableau 3.6: resultats d'essai d'ouvrabilite des bap a l'etat frais	94
tableau 3.7: resultats des vitesses ultrasoniques et les resistances a la compression par ecrasement « rc » a 28 et 60 jours a base de laitier.	103
tableau 3.8 : differentes correlations de bap en fonction de la teneur en laitier a l'age de 28 et 60 jours.	104
tableau 3.9: resultats des indices de rebondissement, les resistances a la compression par ecrasement « rc28j » et les resistances correspondantes « ri ».	107
tableau 3.10: differente correlation de bap en fonction de la teneur en laitier.	108
tableau 3.11: resistance a la compression a 28 et 60 jours des differents betons etudies.	109
tableau 3.12: les resultats de l'essai de la permeabilite a l'eau en fonction de la teneur en laitier et la duree de cure	112

Liste des symboles et des abréviations

μ_G	L'humidité du gravier, (%)
μ_S	L'humidité du sable, (%)
A_{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
A_{bs}	Coefficient d'absorption du sable
BAP	Béton autoplaçant
BO	Béton ordinaire
C	Ciment
CEM I 42,5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
D_{max}	Diamètre maximal des Granulats
E	Eau
E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
E_{vol}	Le pourcentage d'eau en volume, (%)
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
I_r	Indice de rebondissement médian sur l'éprouvette
M	Différence entre la masse après la mesure de la perméabilité à l'eau et la masse avant la mesure (m après _ m avant).
MAP	Mortier autoplaçant
R^2	Coefficient de corrélation
R_i	La résistance correspondante à l'indice de rebondissement.
S	Ecart type
S/M	Sable/Mortier
SP	Superplastifiant
SP/L	Superplastifiant/Liant
SP/P	Superplastifiant/Poudre
T_{20}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec).
T_{40}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec).
T_{50}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec).
T_{V-F}	Temps d'écoulement à l'entonnoir, (sec).
V	Volume, (m^3)
V	La vitesse ultrasonique
VS	Viscosity Slump
V_w	Volume d'eau, (m^3).
w/p	Water/powder
W_{eff}/C	Eau efficace / ciment
Γ_m	Etalement relatif
ρ_{abs}	Masse volumique absolue, (Kg/m^3)
ρ_{app}	Masse volumique apparente, (Kg/m^3)
ρ_C	Masse volumique du ciment, (Kg/m^3)
ρ_E	Masse volumique d'eau, (Kg/m^3)
ρ_G	Masse apparente du gravier, (Kg/m^3)
ρ_S	Masse volumique du sable, (Kg/m^3)
II	Pourcentage de laitance, (%)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'utilisation des Bétons autoplaçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années. Les BAPs se différencient des bétons traditionnels vibrés, notamment par leurs propriétés à l'état frais. La composition des BAPs se caractérise par un volume élevé de pâte (ciment + additions minérales et chimiques + eau) et un volume faible de granulats, ce qui limite les frottements intergranulaires. Un BAP incorporera alors une quantité élevée de fines et une quantité d'eau relativement faible. La fluidité souhaitée sera atteinte en introduisant des additions chimiques telles que les superplastifiants.

Comme tous les bétons, les BAP sont influencés par les conditions climatiques : le climat chaud, sec et/ou venteux, par exemple provoquent l'évaporation rapide de l'humidité entraînant un retrait irrégulier et par conséquent la création de contraintes thermiques sévères dans le béton. Ces effets peuvent nuire la qualité du béton (la résistance à la compression et la durabilité), surtout pendant le durcissement ou les réactions d'hydratation du BAP sont relativement faibles.

Le problème de fissuration précoce est fréquemment résolu par la cure du matériau à l'état plastique. La cure protège le béton à un moment où ce dernier est sujet à des déformations plastiques importantes. A très jeune âge, il est impératif de contrôler le retrait plastique pour garantir l'esthétique et la durabilité des matériaux cimentaires.

La cure du béton est un procédé permettant de maintenir des taux d'humidité et une température favorable à l'hydratation du ciment nécessaire à son durcissement pour éviter sa dessiccation, durant une période bien définie (3 à 7 jours). Elle permet au béton de développer les propriétés requises, telles que, la durabilité, la résistance au gel/dégel, la résistance en compression, aussi la cure du béton autoplaçant doit intervenir dès la fin de la mise en œuvre, en raison de la quantité élevée de pâte et du faible rapport eau sur ciment, qui peuvent accroître et accélérer les effets du retrait.

Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'effet de la cure sur les performances des bétons autoplaçants à base de laitier.

Ce mémoire est divisé en 3 parties :

- ❖ Une recherche bibliographique axé sur : La cure et ses objectives, L'ensemble de la condition climatique influencent le béton et nécessitant une cure, Le béton autoplaçant et ses différentes propriétés ainsi que L'impact de la cure sur le béton autoplaçant.
- ❖ Le deuxième chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du BAP ainsi que les différents essais réalisés en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.
- ❖ Le troisième chapitre présente et discute les différents résultats obtenus de cette étude expérimentale.
- ❖ Enfin, des conclusions générales ainsi que les perspectives de cette étude sont proposées.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EFFET DE LA CURE SUR LA PERFORMANCE DES BÉTONS AUTOPLACANTS

1.1 Généralités

Dans ce chapitre, nous allons présenter une revue bibliographique sur les propriétés mécaniques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci ainsi que sa durabilité sous l'effet de la cure humide.

1.2 La cure

La cure est définie comme étant « un procédé pour maintenir les conditions d'humidité et de température dans un béton frais mis en place pour permettre une hydratation du ciment (le cas échéant) et l'occurrence de réactions pozzolanique, de telle sorte que les propriétés potentielles du mélange peuvent se développer » [1].

Un manque de cure conduit à une hydratation insuffisante de la couche superficielle du béton par manque d'eau, ce qui augmente la porosité et, par conséquent, la sensibilité à la carbonatation. La réduction du temps de cure provoque des conséquences néfastes à long terme alors qu'une cure humide prolongée limite la profondeur de carbonatation [2].

La cure du béton est un procédé lui permettant de maintenir des taux humidité et une température favorable lors de l'hydratation du ciment nécessaire à son durcissement pour éviter sa dessiccation, durant une période bien définie (3 à 7 jours). Elle permet au béton de développer les propriétés requises, telles que, la durabilité, la résistance au gel/dégel, la résistance en compression [3,4].

La cure du béton autoplaçant doit intervenir dès la fin de la mise en œuvre, en raison de la quantité élevée de pâte et du faible rapport eau sur ciment, qui peuvent accroître et accélérer les effets du retrait [5].

1.3 Conditions climatiques

Les conditions climatiques ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

1.3.1 Temps chaud

Le temps chaud peut être défini comme une période de haute température pour laquelle des précautions particulières doivent être prises pour assurer le traitement, la mise en place, la finition et le durcissement du béton. Les problèmes de chaleur sont fréquemment rencontrés en été, mais les facteurs climatiques associés : de vents violents, de faible humidité et le rayonnement solaire peuvent survenir à tout moment, surtout dans les climats arides ou tropicaux.

Les conditions météorologiques chaudes provoquent un taux rapide d'évaporation de l'humidité de la surface du béton est accélère son durcissement, entre autres problèmes. Généralement, l'humidité relative élevée a tendance à réduire les effets de la haute température [6].

a. Température

En règle générale, dès que la température mesurée sur le chantier est durablement supérieure à 25°C, des dispositions sont à prendre dans le programme du bétonnage. La température élevée provoque un accroissement de la demande en eau, ce qui se traduit par une augmentation du rapport eau/liants et une diminution de la résistance à la compression. La température de maturité a un rôle majeur sur le développement des propriétés mécaniques du béton [6].

La température en l'Algérie souvent à 35 °C dans les zones côtières et plus dans le sud qui peut atteindre 50°C durant le mois de mai, juin, juillet et aout (les mois les plus chauds de l'année). La température maximale moyenne en été peut s'élever à 45 ° C, tandis que le moyen varie de minimum de 25 à 35 °C. Lorsque cette température ambiante élevée est associée à environ 11 heures de soleil direct, il est compréhensible que la température de la surface du béton et du coffrage puissent être beaucoup plus élevés. En outre, une variation de la température ambiante jusqu'à 20 °C en particulier quand il est jeune [10].

b. Rayonnement solaire

La température de l'air dépend directement du rayonnement solaire en absence de nébulosité et de pluie. Dans ce cas, le rayonnement direct va provoquer l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulat et eau). L'ensoleillement induit également à l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures et

le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier s'est fortement réchauffé. Il en résulte une augmentation de température du béton frais.

Après la mise en place et le serrage du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces exposées et fait surgir un risque de fissuration par retrait plastique, ce qui nécessite un mode de cure rigoureux. Par temps chaud, la nébulosité et la pluie diminuent l'effet du rayonnement solaire puisqu'elles en absorbent une partie. En termes de conditions ambiantes, il s'ensuit une diminution de la température et l'augmentation de l'humidité relative. Cela a pour effet de limiter l'évaporation [6].

c. Évaporation

Les paramètres cités précédemment influencent d'une manière directe sur le phénomène d'évaporation, qui est le processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état de gaz ou de vapeur. L'eau bout à 212 degrés F (100 degrés C), mais il commence réellement à s'évaporer à 32 degrés F (0 °C) ; elle se produit juste d'une manière extrêmement lente. Lorsque la température augmente, la vitesse d'évaporation augmente également.

L'évaporation rapide (qui dépasse 1 kg/m²/h) due au climat chaud est la principale cause des problèmes, qui provoque principalement le retrait plastique, généralement la fissuration due au retrait plastique se produit quand le taux d'évaporation dépasse la vitesse de remontée de l'eau de ressuage, les fissures dues au retrait plastique peuvent être très profondes, avoir une largeur de 0.1 mm à 3 mm et peuvent avoir une longueur qui peut atteindre 1 m, d'où la diminution de la résistance et de la durabilité [7].

D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après la mise en œuvre [7], car la dessiccation du matériau est liée au phénomène d'évaporation.

Le risque de fissuration du béton frais est principalement influencé par l'évaporation, qui dépend des conditions environnementales, telles que la température de l'air ambiant, l'humidité relative et la vitesse du vent [8], un taux d'évaporation dépassant 1,5 kg/m²/h s'est révélé préjudiciable pour la fissuration précoce de la structure cimentaire [9].

L'abaque de l'American Concrete Institute (ACI) permet d'estimer le taux de vitesse d'évaporation du béton en fonction des paramètres : température, humidité, vitesse du vent (figure 1.1)

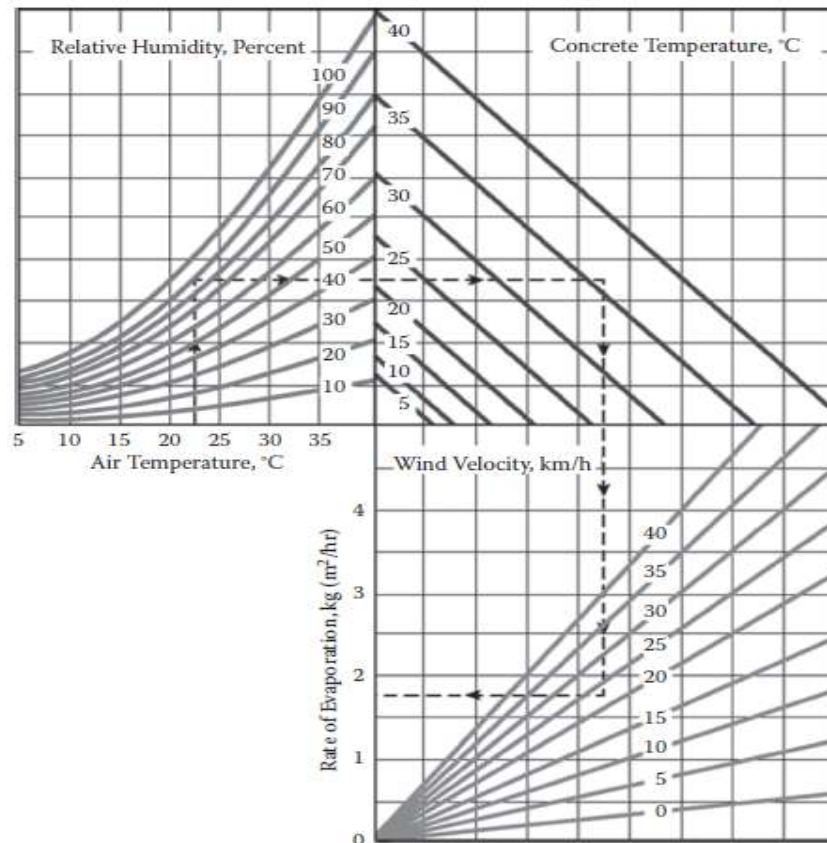


Figure 1.1: Abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) [6].

1.3.2 Temps froid

Le temps froid est défini par le Comité ACI 306 comme une période de trois jours successifs où la température moyenne quotidienne de l'air tombe en dessous de 5 °C et reste en dessous de 10 °C pendant plus de la moitié de n'importe quelle période de 24 heures. Dans ces circonstances, tous les matériaux et les équipements nécessaires à la protection et le durcissement adéquats doivent être prêts à l'emploi avant le démarrage du coulage du béton. Le bétonnage normal peut être repris dès que la température ambiante est supérieure à 10 °C pendant plus d'un demi-jour.

La pression de dilatation induite par le gel se produit principalement par deux sources premièrement, la transformation de l'eau en glace entraîne une augmentation du volume d'environ 9 %. Par conséquent, l'expulsion d'une certaine quantité d'eau du pore où la glace est formée. La deuxième force de dilatation due au gel provient de la diffusion de l'eau qui entraîne la croissance d'un nombre relativement faible de cristaux de glace. Cette diffusion est due aux pressions osmotiques engendrées par l'augmentation locale de la

concentration en sels dissous survenant lors de la séparation de l'eau gelée du reste de l'eau des pores. Chaque cycle de gel provoque une migration de l'eau vers les zones où elle peut geler. Ces zones de gel comprennent de fines fissures qui s'élargissent sous l'effet de la pression de la glace et ne se referment pas lors du dégel, puis elles se remplissent d'eau [7].

1.3.3. Temps venteux

Le vent accélère l'évaporation. Pour un béton exposé, la vitesse des vents est également importante ; elle contribue avec une faible humidité relative à une perte d'humidité du béton et pourrait entraîner la fissuration, la mauvaise qualité de surface et la durabilité [6].

La cinétique linéaire de la perte de masse dans des conditions de séchage modéré est sans doute liée à la grande porosité du matériau et à son rapport E/C élevé. Avec un flux d'évaporation beaucoup plus faible, les déformations ainsi engendrées seront moins importantes que celles obtenues dans des conditions de séchage sévère (avec vent). Le flux d'évaporation évolue en fonction de la quantité d'eau présente dans le béton, plus il y a d'eau plus l'évaporation est importante [10]. La cinétique d'évaporation dépend aussi des conditions environnementales et de séchage, comme le montre la figure 1.2.

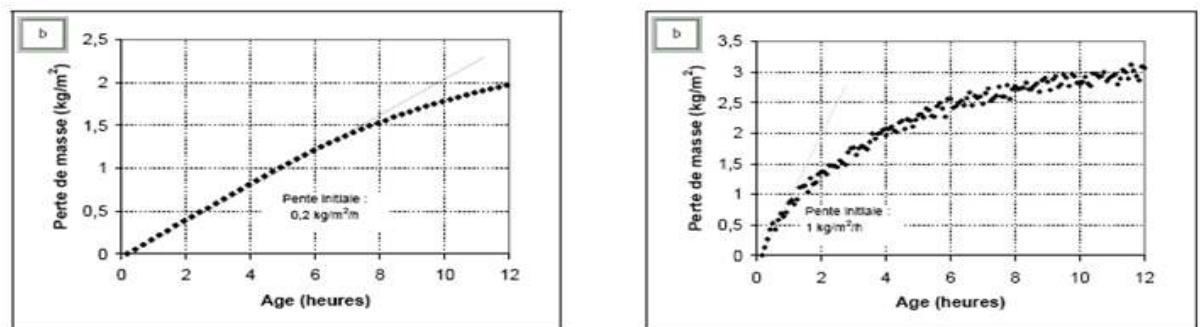


Figure 1.2: Évolution de la perte de masse : avec vent(a), et sans vent(b) [10].

1.4 L'objectif de la cure

L'objectif de la cure est de prévenir la perte d'eau du béton et, si nécessaire, l'approvisionnement en eau supplémentaire et de maintenir une température favorable au matériau pour une période de temps suffisante, pour bien s'hydrater [11,12].

Si la quantité d'eau initialement contenue dans le béton (eau de gâchage) parvient à maintenir une hydratation suffisante pour le développement des propriétés mécaniques du

béton alors une cure est nécessaire pour s'assurer que l'eau de gâchage reste dans le béton jusqu'à ce que les propriétés recherchées soient atteintes. La cure est nécessaire dès que le béton est soumis au séchage, car le séchage peut entraîner des dommages au béton ou empêcher le développement des propriétés requises.

Le maintien d'un taux d'humidité élevé ne dépend pas seulement du type de cure mis en œuvre, mais aussi des conditions environnementales dans lequel le béton est mis en place, car à sa sortie du malaxeur, ces dernières ont une influence directe sur les différents mécanismes qui régissent le comportement du matériau poreux [13].

1.5 Les bénéfices de la cure sur les performances du béton

Dans cette partie, nous allons voir les causes générales des défaillances dans les structures en béton et de dallage, et examiner comment le risque de leur apparition peut être réduit avec la cure, particulièrement à jeune âge.

1.5.1 La fissuration

Le béton présente presque toujours des fissurations : c'est un matériau hétérogène, à faible tension et qui subit d'importantes fluctuations dues à la température interne, à l'humidité et aux changements de température. Le défi est de limiter la largeur et l'étendue des fissures de sorte que le béton puisse avoir les performances prévues. Pour ce faire, les spécialistes ont besoin de comprendre les mécanismes de développement des fissures [14].

1.5.1.1. Contrainte liée au changement de volume

Le Changement de volume se produit dans les matériaux cimentaires parce que :

- Le volume des produits d'hydratation est inférieur à celle de la matière première d'origine (retrait autogène).
- L'humidité est perdue par le système, soit avant la prise (retrait plastique), après la prise (retrait de séchage), ou à cause de la dessiccation interne.
- Les changements de température.

Ces effets se cumulent et se développent à des taux différents, et peuvent avoir des amplitudes différentes [14].

1.5.1.2 Les propriétés mécaniques du béton

Les contraintes sont proportionnelles au module d'élasticité du béton, par conséquent, un module d'élasticité élevé, qui tend à correspondre à une haute résistance, contribue à la fissuration par l'augmentation de la contrainte.

Le développement des propriétés mécaniques, particulièrement dans les premières 24 heures, est essentiel à la prévention de la fissuration. Malheureusement le module d'élasticité tend à se développer plus rapidement que la résistance dans les premières heures après la mise en place (Figure 1.3) [15].

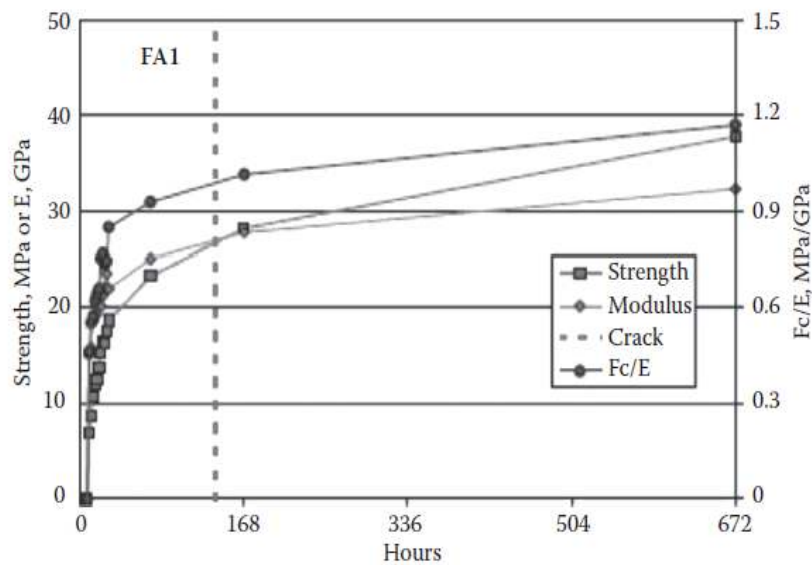


Figure 1.3: Évolution de la résistance et le module d'élasticité pour un béton, comparée au temps de l'occurrence de fissures avec un test de retrait [15].

1.5.1.3 Les retraits

Le retrait est caractérisé par une déformation du béton (diminution du volume) sans aucun chargement extérieur. Il se décompose en quatre formes distinctes : le retrait thermique, le retrait endogène, le retrait de dessiccation et le retrait plastique :

a. Le retrait plastique

Si le taux d'évaporation est supérieur à celui du ressuage, l'interface air-eau se déplace au-dessous de la surface de la matrice du béton. En conséquence, les pores capillaires seront partiellement remplis, et des ménisques se formeront sur l'interface entre l'air et l'eau dans les capillaires [16]. La direction des forces mises en place par la tension de la surface sur

l'interface à une composante normale sur la face du capillaire, la fermeture du capillaire lors du séchage entraîne le retrait du béton [21].

L'augmentation de la teneur en matériaux cimentaires augmente la probabilité de fissures de retrait plastique en raison de ressuage réduit. Pour les mêmes raisons, l'utilisation de fumée de silice rend le béton particulièrement vulnérable à la fissuration de retrait plastique. Les retardateurs de prise augmentent la tendance aux fissures de retrait plastique quand le taux d'évaporation est élevé, parce que le béton « plastique » pour un temps plus long. Ces retardateurs peuvent être causés par un temps froid, des sols aux fondations humides, faible teneur en ciment, pouzzolane ou laitiers, des retardateurs, et la plupart des réducteurs d'eau, **NRMCA [20]** a recommandé les précautions suivantes afin de minimiser les fissures de retrait plastique :

- Avoir suffisamment de personnel, de matériels et fournitures pour placer et finir le béton rapidement. Couvrir le béton de jute humide, les feuilles de polyéthylène ou du papier de construction entre les opérations de finition pour éviter le séchage.
- Opérer la cure du béton dès que possible, humidifiez le sol de fondation, le coffrage, et le ferrailage avant la mise en place du béton.
- Par un temps très chaud et sec, utiliser des retardateurs d'évaporation, des pulvérisations de brouillard, brise-vent temporaires, et des parasols au besoin. Envisagez de placer le béton à la fin de l'après-midi, début de soirée ou de nuit [14].

b. Retrait de séchage

De même pour le retrait plastique, le retrait de séchage est le résultat de la perte d'humidité des capillaires, sauf qu'il commence après la prise finale. Encore une fois, les forces sur les capillaires se traduisent par le retrait de la pâte. La différence est que la forme de la fissuration, le cas échéant, sera différente. Une microfissuration étendue peut se produire même avec un séchage doux. Quand le séchage se poursuit, certaines microfissures peuvent confluer pour former des fissures de séchage de retrait visibles [21].

c. Les effets thermiques

Habituellement, le retrait thermique est associé au béton de masse : les barrages, les fondations et les éléments structurels dans lesquels la chaleur de l'hydratation ne s'est pas

facilement dissipée. La fissuration qui débute dans les éléments massifs en béton est due principalement à des contraintes thermiques [25].

1.5.2. Conclusion

Comme indiqué précédemment, la fissuration peut être réduite de manière significative si l'eau est maintenue dans le système aussi longtemps que possible pour permettre à l'hydratation de se réaliser et aux propriétés mécaniques de se développer avant le séchage avant l'introduction des contraintes de retrait [25,26]. En outre, la protection du béton à jeune âge contre les fluctuations thermiques permettra de réduire les risques de dommages.

1.5.3. La durabilité

1.5.3.1. Introduction

Souvent, la caractéristique la plus importante du béton n'est pas la résistance, mais la durabilité[27]. La résistance est parfois définie comme étant représentative de la durabilité, car facile à tester, et parce qu'elle est indirectement liée à la durabilité dans de nombreux cas ; certaines mesures nécessaires pour améliorer la durabilité impliquent aussi une augmentation de la résistance. Cependant, les deux ne sont pas similaires (figure 1.4) et, dans certains cas, les mesures qui produisent une résistance élevée sont préjudiciables à la durabilité.

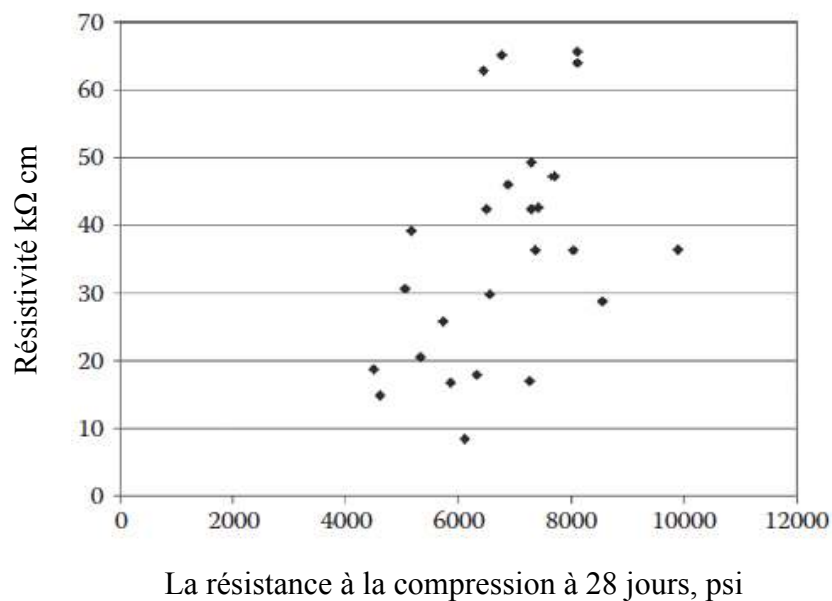


Figure 1.4: Représentation de la résistivité du béton en fonction de la résistance pour les mélanges contenant une variété de liants hydrauliques [28].

La durabilité est dans la plupart des cas liée à l'aptitude du matériau à résister à la pénétration d'agents agressifs. De plus, tout mécanisme de dégradation, même interne au béton, fait intervenir un processus de transport au moins d'eau, et éventuellement d'ions ou de gaz.

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton impliquent les transferts d'agents agressifs à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Les caractéristiques du réseau poreux déterminent les propriétés de transfert et elles sont donc des indicateurs de premier ordre dans la prédiction de la durabilité des structures en béton. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les trois principaux mécanismes de transfert des fluides à l'intérieur du béton sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption. Donc la durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant.

En général, de 20 à 50 % du volume de la pâte est constitué de pores. Le volume et la forme des vides influent sur la qualité des matériaux durcis. On distingue conventionnellement deux (2) types de pores :

- Les macropores (pores capillaires), constituées par des vides entre les hydrates et les anhydres (la taille $D > 10^{-2} \mu\text{m}$).
- Les micropores (pores du gel), constitués par des vides dans les gels hydratés (la taille $D < 10^{-2} \mu\text{m}$).

Les pores capillaires occupent une grande partie du volume du vide dans le matériau, ils conditionnent les mécanismes de transfert. Leur volume diminue progressivement au cours de l'hydratation et dépend en grande partie du rapport eau/ciment (E/C) [30].

1.5.3.2 Les mécanismes chimiques

Les mécanismes fondamentaux derrière les agressions chimiques du béton sont relativement limités, mais complexes. Le ciment comprend un certain nombre de composés, avec des associations principalement de chaux (CaO), de silice (SiO₂), et de l'alumine (Al₂O₃). En outre, le béton contient des agrégats et dans certains cas un renforcement en acier. La sensibilité peut être due aux :

- Composés à base de calcium qui ont tendance à être solubles dans les acides et dans l'eau douce, et vont réagir avec du dioxyde de carbone.
- Composés d'alumine de calcium réagissent avec des sulfates pour former un large sous-produit qui perturbent la matrice.
- Agrégats calcaires qui sont plus sujets à l'abrasion et au polissage, et sont soumis aux attaques acides.

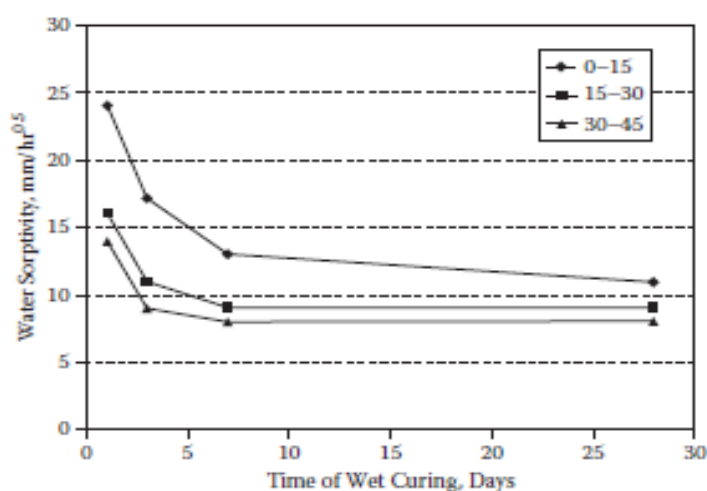


Figure 1.5: L'effet de la cure humide dans le temps à différents niveaux de sorptivité [31].

Il convient de noter que, dans tous les cas d'attaque chimiques, la présence d'eau est nécessaire en tant que réactif ou pour le transport des ions agressifs. Il est donc logique que la réduction de la perméabilité du béton permette de réduire considérablement le risque ou le taux des dommages de toute forme d'attaque chimique. Pour cette raison, des mesures telles que : La réduction du rapport de matériaux-ciment/eau, une cure prolongée (Figure 1.5), l'utilisation judicieuse des matériaux cimentaires supplémentaires sont des mesures efficaces pour améliorer la résistance du béton à une variété de mécanismes d'attaque chimique [31].

1.5.3.3 Facteurs affectant la durabilité du béton

a. La perméabilité du béton

Dans de nombreux cas, ce n'est pas uniquement l'étanchéité des éléments qui contrôle la durabilité des structures, mais aussi la perméabilité du matériau béton. Plusieurs études et relevés sur le terrain montrent que les causes principales de la mauvaise performance du

béton sont plus ou moins liées à la facilité avec laquelle un fluide ou un ion pénètre dans la porosité du béton.

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY qui est valide en régime d'écoulement laminaire [32].

Selon Ho et al. [33], la perméabilité est la propriété qui permet le passage d'un liquide à travers le matériau et elle se distingue de la pénétration de l'humidité par l'absorption due à l'action des capillaires. Dans les structures, l'eau est absorbée par capillarité, la mesure du taux d'absorption donne souvent une indication sur la structure des pores du béton ou du mortier.

Abbas et al. [34], ont démontré expérimentalement que les relations empiriques, qui ont pu être établies par d'autres chercheurs pour certains bétons entre la perméabilité et la résistance mécanique, ne peuvent pas être généralisées. En effet, la résistance en compression est en fonction de la porosité totale du matériau, tandis que la perméabilité dépend de la porosité connectée. Lors de la perméabilité à travers un béton d'ouvrage fissuré, le flux peut se produire dans le réseau poreux, comportant des pores initiaux.

Ravindra et al. [35], ont montré que la perméabilité à l'air est particulièrement sensible au rapport E/C pendant les 7 premiers jours de l'hydratation. Ainsi, après 1 jour ou 4 jours, la perméabilité est réduite par un facteur 10 lorsque le rapport E/C passe de 0,70 à 0,40 respectivement. Aussi, la perméabilité des bétons avec un rapport E/C faible est beaucoup moins sensible à la durée de la cure humide (figure 1.6).

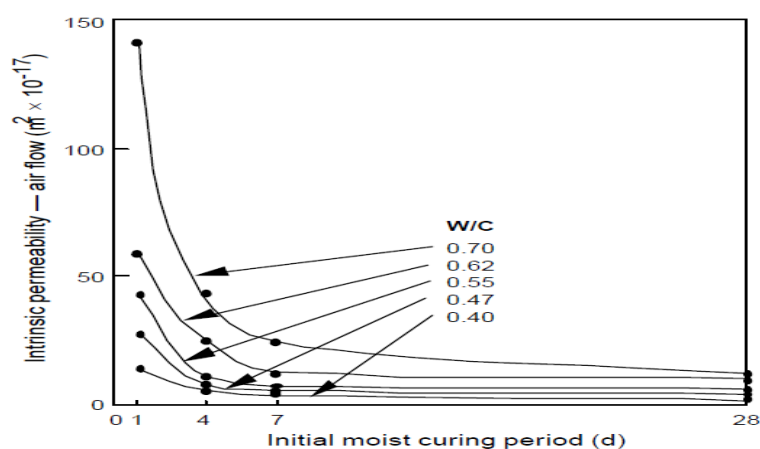


Figure 1.6: Perméabilité à l'air du béton en fonction du rapport E/C et de la durée de la cure humide [35].

D'après la figure (1.7), puisque la résistance à la compression est étroitement liée à la valeur du rapport E/C, on trouve aussi qu'il existe une relation entre la perméabilité à l'air et la résistance à la compression.

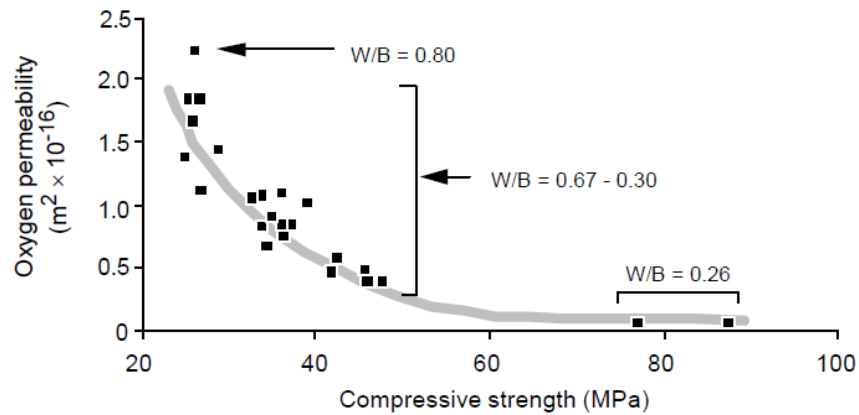


Figure 1.7: Perméabilité à l'oxygène des bétons fabriqués avec et sans ajouts [36].

D'après **Torrent et al** [36], quelle que soit la composition du béton (rapport E/C, fumée de silice, cendres volantes), la résistance à la compression semble un bon indicateur de la perméabilité à l'air.

La figure (1.8) montre qu'il ya une faible variation de la charge totale lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,5. Cependant la charge totale chute rapidement pour des rapports E/C inférieurs à 0,4 et devient presque négligeable lorsque le rapport E/C est de 0,25 [37].

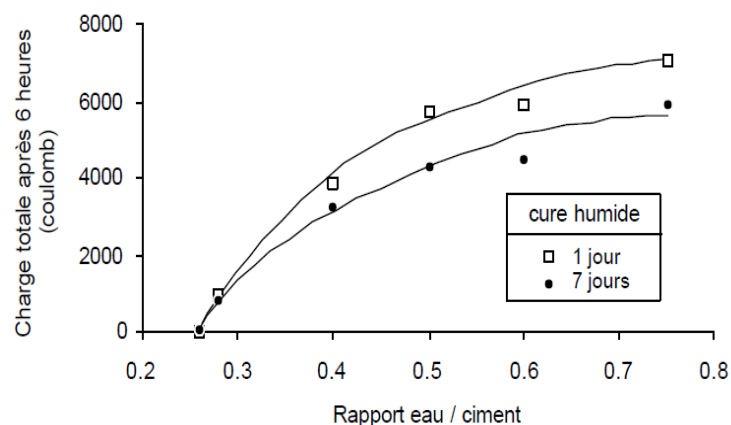


Figure 1.8: Perméabilité des ions chlores en fonction du rapport E/C et de la longueur de la cure humide [37].

1.5.3.4 Effet du laitier sur la durabilité

La composition des laitiers de haut fourneau et leur structure vitreuse varient en fonction des procédés de fabrication et de la méthode de refroidissement (un mélange de chaux, de silice et d'alumine) [18]. La composition chimique moyenne d'un laitier type est donnée dans le tableau 1.1. Les laitiers doivent être constitués au minimum de deux tiers en masse de la somme de (CaO, MgO et SiO₂). Le restant contient de l'alumine (Al₂O₃) ainsi que de faibles quantités d'autres composants. Le rapport massique entre la somme (CaO + MgO) et SiO₂ doit être supérieur à 1 [19].

Tableau 1.1: La composition chimique principale moyenne d'un laitier [22].

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
30 à 50 %	27 à 42 %	5 à 33 %	0 à 21 %

La présence de cendres volantes et de laitier réduit la demande en eau de gâchage et améliore la structure poreuse des matériaux, en diminuant la dimension des pores [23].

Galle [50] a conclu que la porosité à l'eau des pâtes de CEM V est plus grande que celle de CEM I, mais la taille des pores est plus petite dans les CEM V. Comme pour les pâtes, la dimension des pores est plus petite dans le béton à base de ciment CEM V par rapport à celle du ciment CEM I (Figure 1.9).

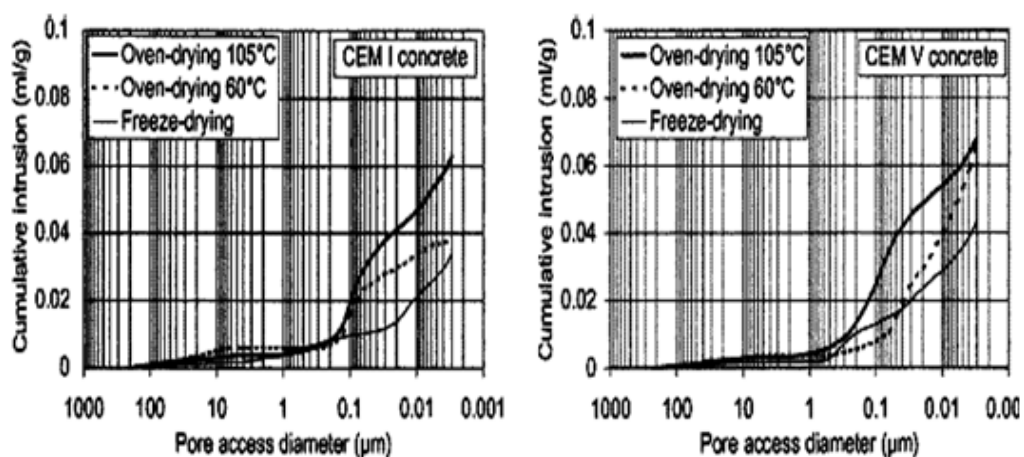


Figure 1.9: Distribution de la taille des pores dans le béton (âgé 12 mois, E/C = 0,43) [50].

On constate sur la Figure 1.9 qu'avant 28 jours, la taille des pores ouverts dans les pâtes de ciment aux cendres volantes ou au laitier est plus élevée que celle du ciment Portland. Cependant, après 28 jours, la taille des pores diminue plus significativement que celle du ciment CEM I confirmant les résultats trouvés par d'autres chercheurs et montrés sur la figure 1.10.

Bejaoui [107] a également étudié la porosité de pâtes de CEM I et CEM V, à différents rapports E/C. La porosité totale reste plus grande dans le cas des pâtes de CEM V, mais la répartition de taille des pores dans les matériaux à base de ciments CEM V est plus étroite et plus fine.

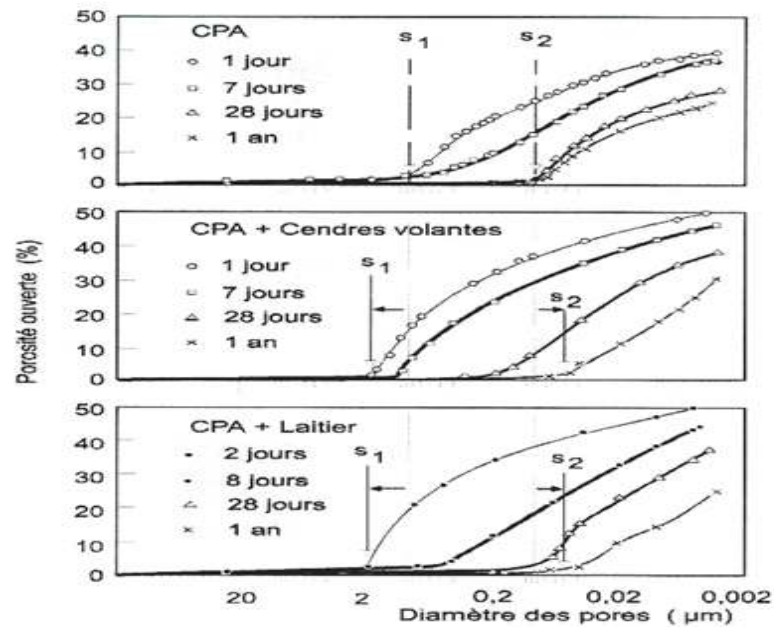


Figure 1.10: Influence des cendres volantes et du laitier sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [108].

1.5.4 La résistance à la compression

La résistance du béton dépend de plusieurs paramètres tels que la pâte de ciment, les granulats, la liaison pâte granulat et la concentration granulaire dans le béton.

Mouret et al. [46] ont montré que dans un béton ordinaire, les propriétés mécaniques des granulats sont supérieures à celle de la pâte de ciment. La résistance du béton dépendra de la résistance de la pâte et sa liaison au granulat. La pâte de ciment est liée à sa structure poreuse, ses propriétés dépendent du rapport E/C et du degré d'avancement des réactions d'hydratation selon **Soroka [47]**.

Il n'est pas rare à la fois dans la littérature scientifique [48, 49] et dans la pratique pour les ingénieurs de se préoccuper de l'effet de la cure sur la résistance. Ce n'est pas surprenant, parce que la résistance est considérée comme la première propriété du béton qui régit les performances du système, en particulier dans le contexte de la conception structurelle. Il n'est pas surprenant aussi, car une grande partie des données de la littérature indique qu'il ya une baisse significative de la résistance avec une faible cure (Figure 1.11).

Les résultats sur la figure (1.12) confirment que l'augmentation de la taille de l'échantillon implique un effet décroissant d'une faible cure lors des essais de compression.

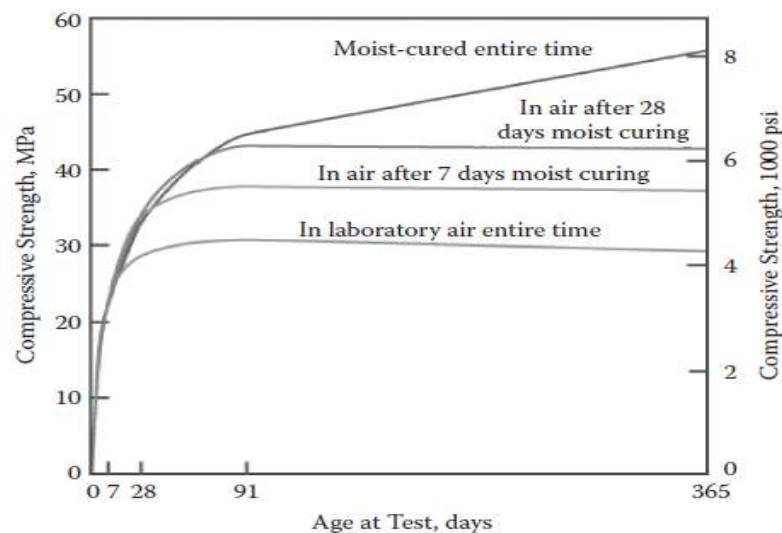


Figure 1.11: La résistance à la compression en fonction de temps de la cure pour les petits échantillons [53].

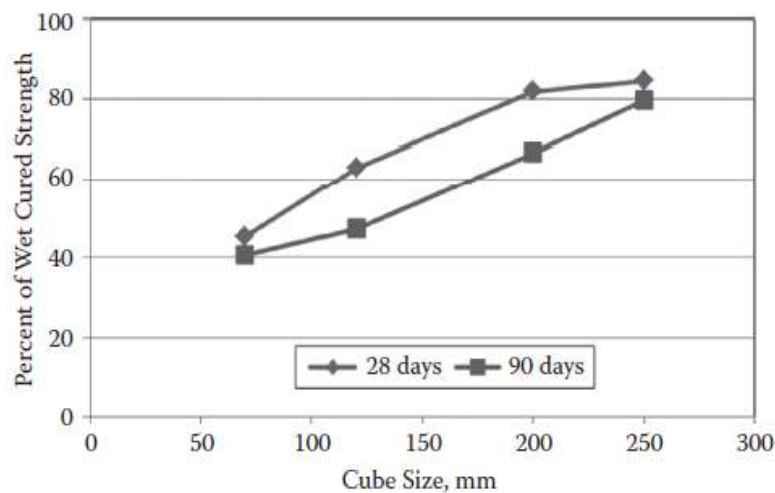


Figure 1.12: L'effet de la cure lors des tests de compression en fonction de l'augmentation de taille de l'échantillon [52].

Ramezaniapour et Malhotra [54] ont observé que le gain de résistance initiale obtenu par les bétons durcis à 38 °C et 65 % d'humidité relative en comparaison avec celle des bétons durcis sous cure humide n'est pas maintenu à long terme. Les résistances à la compression à 180 jours sont significativement plus faibles que la résistance des bétons durcis dans une cure humide (Figs. 1.13 à 1.16). L'absence de durcissement du béton dans une cure humide affecte négativement sa résistance à la pénétration des ions de chlore et cela affecte sa résistance à la compression.

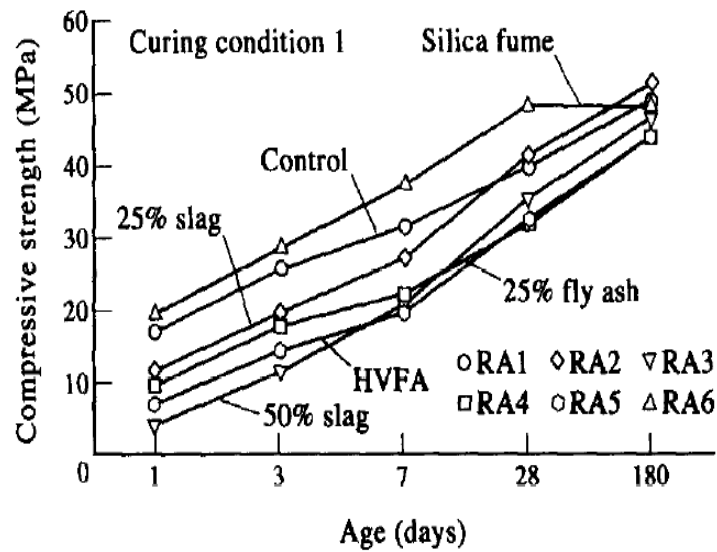


Figure 1.13: Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide [54].

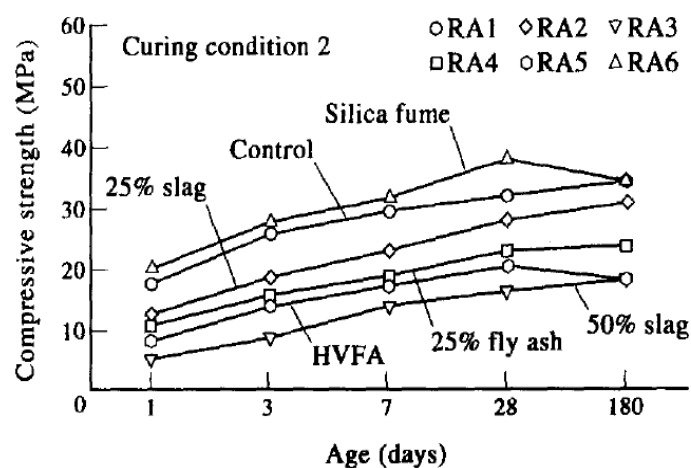


Figure 1.14: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage [54].

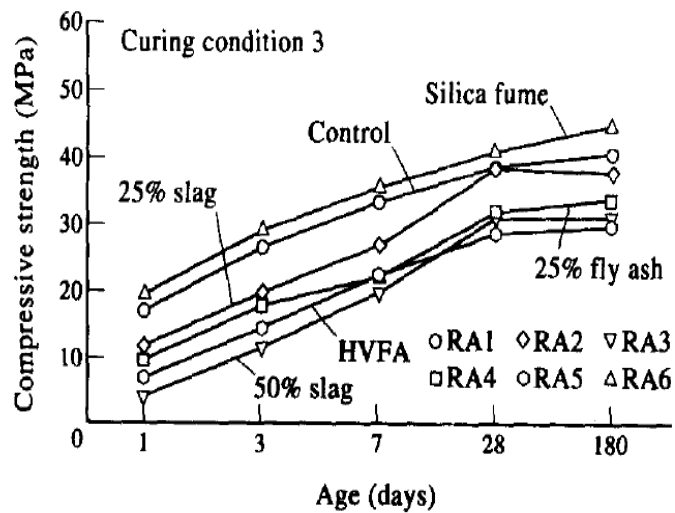


Figure 1.15: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide [54].

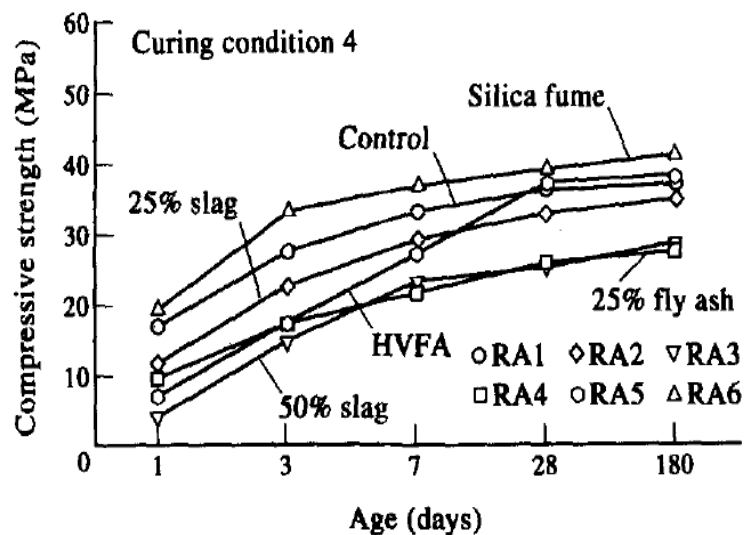


Figure 1.16: Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38 °C et 65 % d'humidité [54].

La cure du béton provoque une augmentation de résistance à la compression du béton, à la traction et le module d'élasticité correspondant (Fig.1.17). Il est recommandé lors de la conception des structures en béton de prendre en compte la variabilité des propriétés du béton avec les variations de température d'humidité qui pourraient influencer sur le comportement structurel, la résistance et la rigidité.

Cebeci [57] a analysé l'effet de l'augmentation de la température de durcissement de 17 à 37 °C simultanément avec l'insuffisance de l'humidité relative du support de séchage (à

partir de saturation de 75 % et 33 %) sur le développement de la résistance dans le béton. Il a montré que le manque de l'humidité, plutôt que l'augmentation de la température, est le facteur le plus préjudiciable.

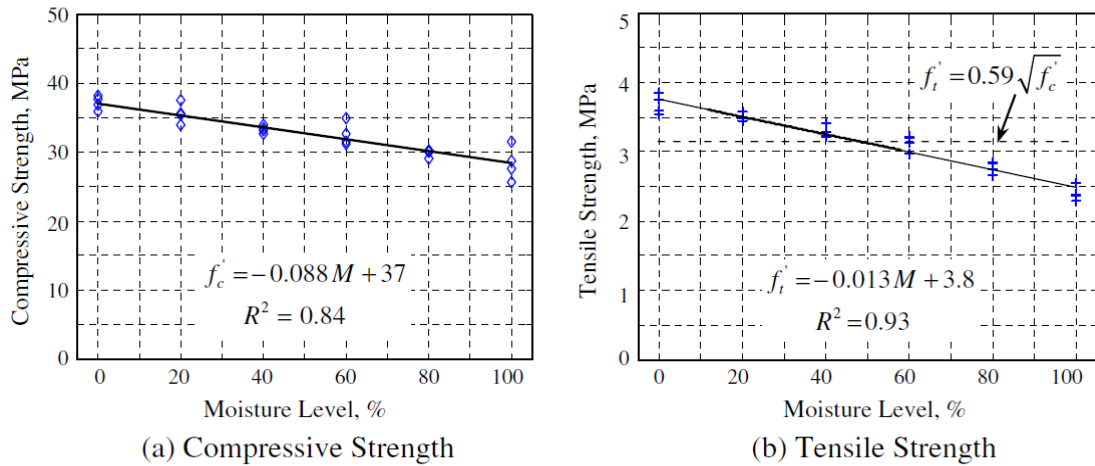


Figure 1.17: Effet du degré de saturation sur la résistance à la compression et à la traction à 28 jours [55].

Lachmat et Kenai [60] ont montré que la durée de cure a un effet positif sur la résistance à 28 jours. En effet les meilleures résistances approchant la référence ont été obtenues pour la durée maximale de 14 jours de cure, surtout pour l'environnement aride. Un jour et trois jours de cure n'ont pratiquement pas d'effet sur la résistance dans cette zone. La toile de jute régulièrement mouillée et maintenue pendant 14 j a donné des résultats satisfaisants sans pour autant avoisiner la valeur de référence.

À l'aire libre, 3 jours de cure donnent des résultats comparables à la résistance de référence, tandis qu'en zone semi-aride il en faut 7 jours pour avoir les mêmes valeurs. La toile de jute régulièrement humidifiée donne les meilleurs résultats surtout en zone méditerranéenne.

Bakir et al. [56] ont constaté que le climat sec influe négativement sur la résistance caractéristique des mortiers (Figs. 1.18 & 1.19). Ceci est dû à l'évaporation rapide d'une quantité d'eau des couches superficielles, ce qui entraîne des microfissures dans la matrice cimentaire surtout en présence d'une température élevée.

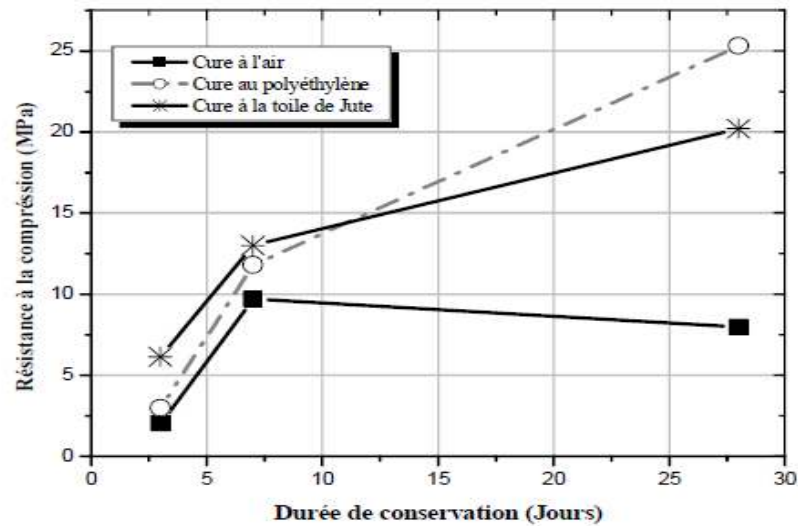


Figure 1.18: Influence des méthodes de cure sur la résistance f_c , des éprouvettes conservées à l'air libre [56].

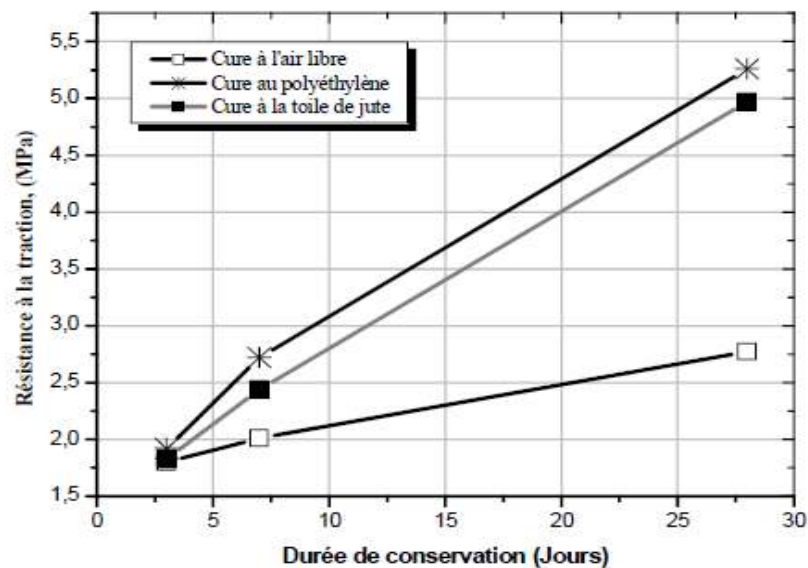


Figure 1.19: Influence des méthodes de cure sur la résistance f_t , des éprouvettes conservées à l'air libre [56].

D'après Al-Ani et al. [58], le retard de cure du béton par temps chaud a un effet négatif sur la résistance à la compression, et le premier jour de retard de cure a le plus grand effet. La cure initiale est plus efficace pour les bétons avec un dosage de ciment élevé. Une période minimale de cure de 3 jours est suffisante par temps chaud, tandis qu'une période de cure minimale de 7 jours est nécessaire pour le béton avec faible teneur en ciment (Fig. 1.20).

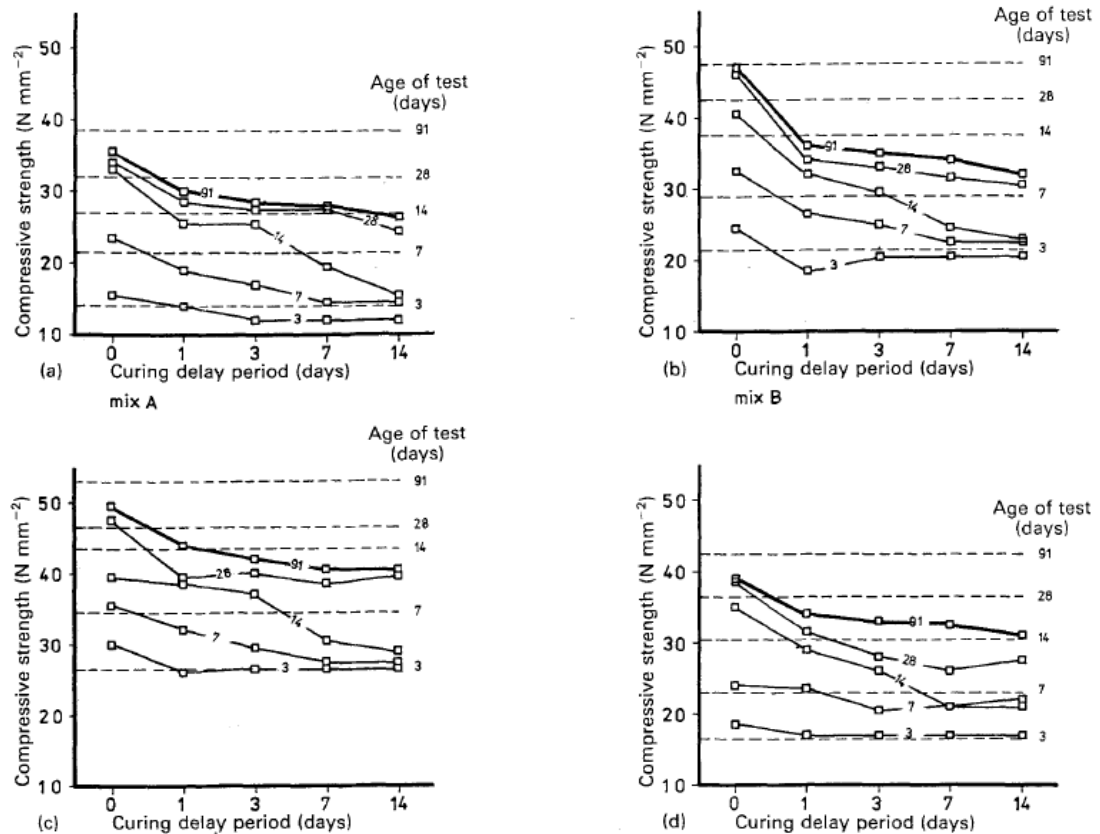


Figure 1.20: Effet de la période de cure sur la résistance à la compression du béton, cure à l'eau à l'intérieur du laboratoire, cure en dehors de la toile de jute [58].

Selon **Balendran et Martin-Buadesla [59]**, la cure du béton ordinaire à des températures élevées améliore le développement de la résistance initiale du béton. La substitution partielle du ciment par les cendres volantes améliore sa résistance initiale à la compression et à la traction et a également sa résistance à la flexion.

Kenai et al [61], ont constatés que la durée de cure humide a un effet positif sur la résistance à la compression du béton à base de fines calcaires. Des échantillons du béton ont été conservés dans l'eau pendant 1, 3 ou 7 jours. Après, les éprouvettes sont conservées à l'air libre (toit du laboratoire) jusqu'aux échéanciers des essais. L'intérêt d'une cure humide prolongé est bien montré dans la figure 1.21.

Ceci est à prévoir, car la qualité du durcissement affectera seulement la surface extérieure de l'échantillon. Plus les échantillons deviennent plus grands, plus le volume relatif lésé par une mauvaise cure devient petit.

Bentur et Goldman [63] ont également noté que pour 70 mm^3 , une faible cure à diminuer la résistance de 20 %, mais a augmenté de 100 % la carbonatation.

De même **Nassif et Suksawang [62]** ont rapporté des effets importants sur la durabilité, mais de faibles effets sur la résistance (Figure 1.22). En effet, la résistance est pilotée par la qualité du volume total de l'échantillon, tandis que les tests de durabilité en général tiennent compte seulement de la qualité du béton de surface.

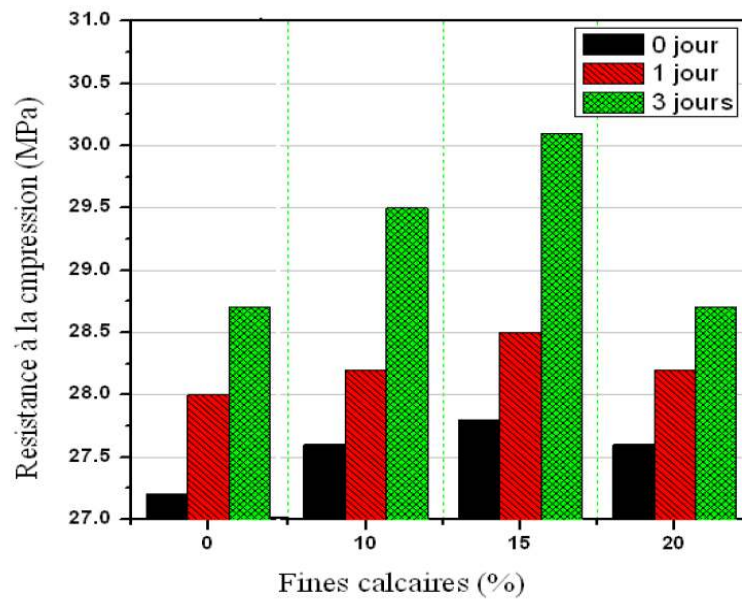


Figure 1.21: Effet de la cure humide sur l'évolution de la résistance [61].

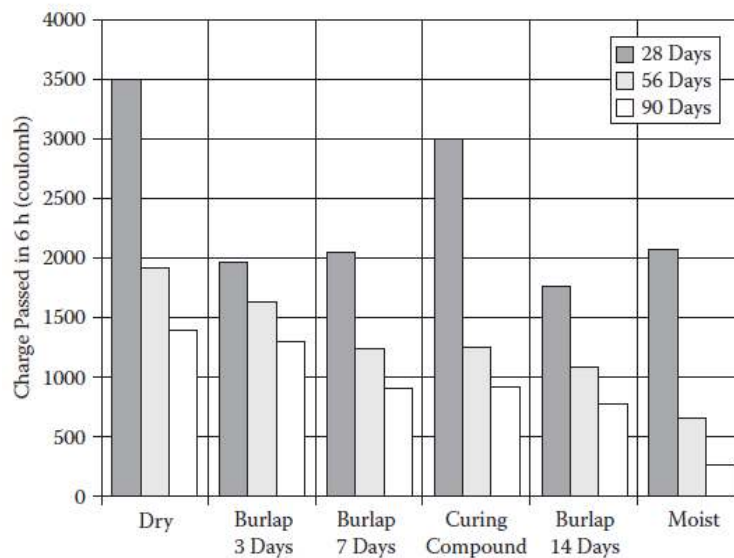


Figure 1.22 : Données indiquant une augmentation significative dans la pénétration du chlorure avec une mauvaise cure [62].

1.5.4.1 Contrôle de la résistance à la compression du béton

D'une manière générale les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, notamment lors de la confection du béton et lors de sa mise en œuvre.

Compte tenu de ce qui a été précité, très souvent, des doutes sont émis sur la qualité des bétons mis en œuvre. Ces doutes mèneront généralement vers un contrôle sur les ouvrages réalisés. Plusieurs méthodes de contrôle peuvent être envisagées, parmi lesquelles on peut citer les plus couramment utilisées à savoir : les méthodes de contrôle destructif, les méthodes de contrôle par des essais non destructifs.

1.5.4.2 Utilité et avantages des essais non destructifs (ND)

Les essais non destructifs (ND) sur des ouvrages en béton simple, en béton armé ou en béton précontraint sont particulièrement intéressants tant pour la proportion élevée de ces constructions dans l'ensemble des ouvrages, que pour l'importance que représente le contrôle de la qualité directement sur la construction [88]. Le contrôle de la résistance à la compression du béton est habituellement déterminé par les essais destructifs sur des spécimens standards en cylindres, cubes ou prismes pour évaluer la qualité du béton utilisé dans les structures. Cependant, les spécimens ne sont pas vraiment représentatifs du béton dans la structure, à cause de la différence des conditions de mise en place, de serrage et de cure, qui sont des facteurs principaux affectant la résistance du béton. En plus le retard engendré pour obtenir les résultats d'essai [89, 90, 91].

L'essai ND peut être appliqué à de vieilles et à de nouvelles structures en béton. Pour les nouvelles structures, les principales applications sont susceptibles d'être pour le contrôle de la qualité ou la résolution de doutes au sujet de la qualité des matériaux ou de la construction [92]. Alors que pour les structures existantes l'essai est habituellement utilisé pour surveiller périodiquement l'évolution de l'état des structures en fournissant des informations utiles pour un système d'entretien – réparation [93, 94].

Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés dans le caractère non destructif. On peut obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques, économiser des matériaux, du temps et des outils d'essai par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule

éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais [88].

1.5.4.3 Essai sclérométrique

a. Principe de l'essai

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Il a été développé par Ernst Schmidt en 1948 et est connu sous le nom d'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. L'essai est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton durci [7], il consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement d'une masse mobile, qui dépend de la dureté du béton. Plus la distance de rebondissement est grande, plus la surface essayée est dure. Des corrélations empiriques ont été établies entre les propriétés de résistance et l'indice de rebondissement [92].

b. Description de l'appareil

Il existe plusieurs types de scléromètre qui se différencient par la valeur de l'énergie d'impact, type de recul et leur destination à l'essai comme le montre le tableau 1.2.

Tableau 1.2: Différents modèles de scléromètre [96].

Modèle	Énergie d'impact (kgf.m)	Type de recul	Domaine d'utilisation
L	0.075	Linéaire	<ul style="list-style-type: none"> • Élément mince en béton($e < 10\text{cm}$) • Béton à base des granulats légers
M	3.000	Linéaire	Élément massif
N	0.225	Linéaire	Bétons usuels
NA	0.225	Linéaire	Contrôle de la qualité du béton sous l'eau
NR	0.225	Linéaire	Identique au modèle N mais avec un dispositif d'enregistrement des mesures
PT	0.090	Angulaire	Contrôle de la qualité des matériaux de très faible résistance ($R_c < 5\text{Mpa}$)

Ce marteau à une masse approximative de 1,8kg et convient aux essais au laboratoire comme aux essais sur chantier. L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort, qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. La figure (1.23) illustre une vue en coupe d'un scléromètre de modèle N. L'indice de rebondissement est la

mesure enregistrée sur une échelle graduée de 10 à 100 et fixée sur le bâti de l'appareil. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontale [96].

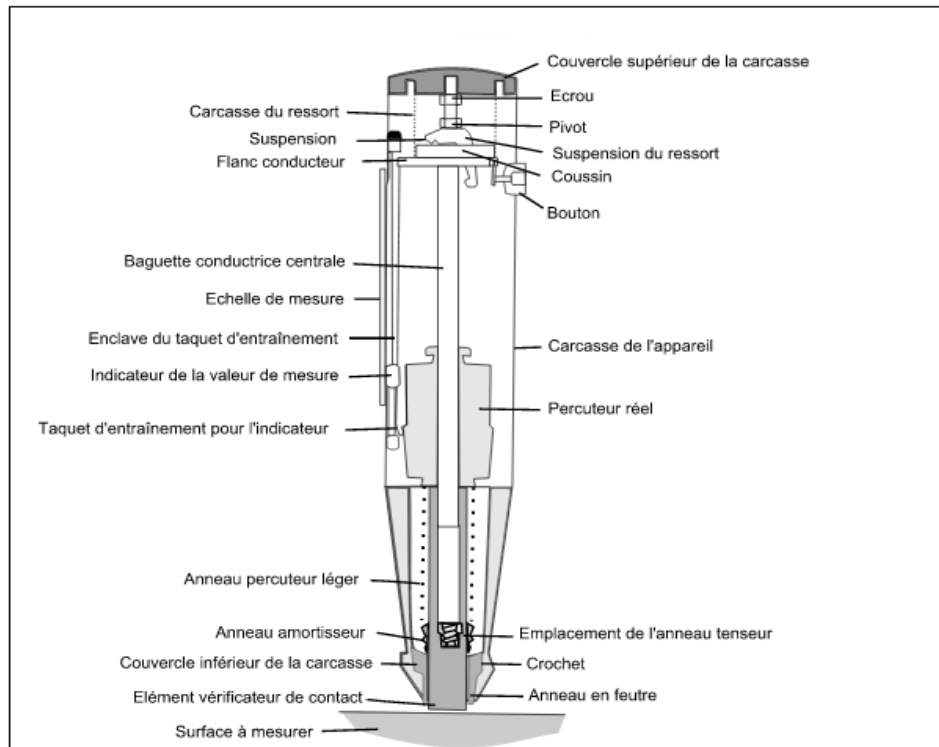


Figure 1.23: Vue en coupe schématique du marteau de rebondissement de Schmidt N [96].



Figure 1.24: Marteau de rebondissement de Schmidt type N.

c. Procédé de mesure

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 par zone et de trouver leur moyenne exprimée sous forme de nombre entier [97, 98]. En éliminant les lectures différentes de la valeur médiane de plus de six unités et ensuite on détermine la moyenne 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. Il est recommandé de définir sur la surface à essayer des zones d'environ 300mm x 300mm, et de tracer un quadrillage de 25mm à 50mm de côté, et de considérer les intersections de ces lignes comme points d'impact de la tige de percussion. La distance minimale entre deux essais de choc étant de 25mm et aucun essai ne doit être réalisé à moins de 25mm du bord de la surface testée [97, 12].

1.5.4.4 Essai ultrasonique

a. Principe fondamental

Cet essai est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, alors la vitesse d'impulsion peut être déterminée. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité comme il a été décrit dans le tableau 1.3 [89,99].

Tableau 1.3: Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [90].

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

b. Description de l'appareil

L'appareillage est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, d'une paire de transducteurs, d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur. Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse [95]. L'équipement peut inclure une batterie rechargeable et une unité de chargement, et également munie d'un afficheur pour le temps mesuré. Il peut également être relié à un oscilloscope, ou à tout autre dispositif d'affichage, pour observer la nature de l'impulsion reçue. Un diagramme schématique est montré à la figure 1.25 [101]. Les fréquences propres des transducteurs se situent généralement dans une plage comprise entre 20 et

150kHz. Les impulsions à haute fréquence s'amortissent plus rapidement que les impulsions de plus basse fréquence. Il est donc préférable d'utiliser des transducteurs à haute fréquence (60kHz à 200kHz) pour les distances de parcours courtes (à partir de 50mm) ou pour le béton à haute résistance, les transducteurs ayant une fréquence de 40kHz à 60kHz conviennent pour la plupart des applications [100, 101]. L'instrument généralement utilisé est représenté à la figure 1.26.



Figure 1.25: Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion [101].

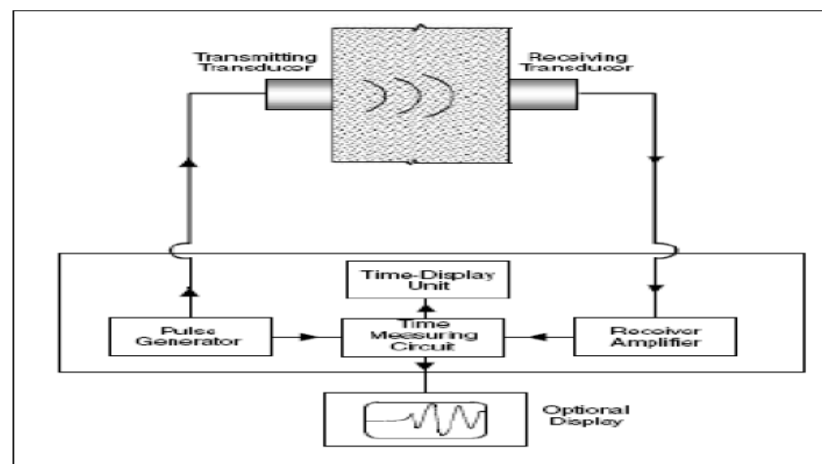


Figure 1.26: Diagramme schématique du circuit d'essai de vitesse de l'impulsion [101].

c. Procédé de mesure

L'opération est relativement simple, mais exige un grand soin afin d'obtenir des résultats fiables. Il doit 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 soit 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 réapplication 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 [50, 100, 103]. Pour la longueur de parcours, il doit mesurer la distance à ligne directe entre les centres des faces des transducteurs avec une précision de 0.5 % de la distance. De même que le temps de passage est enregistré avec une précision de 0.5 % du temps. Le résultat ainsi obtenu de la vitesse de propagation du son doit être exprimé à 10m/s près [100, 103].

Il y a trois configurations possibles dans lesquelles les transducteurs peuvent être arrangés, comme représenté à la figure 1.27 : faces opposées (transmission directe), faces adjacentes (transmission semi-directe), la même face (transmission indirecte).

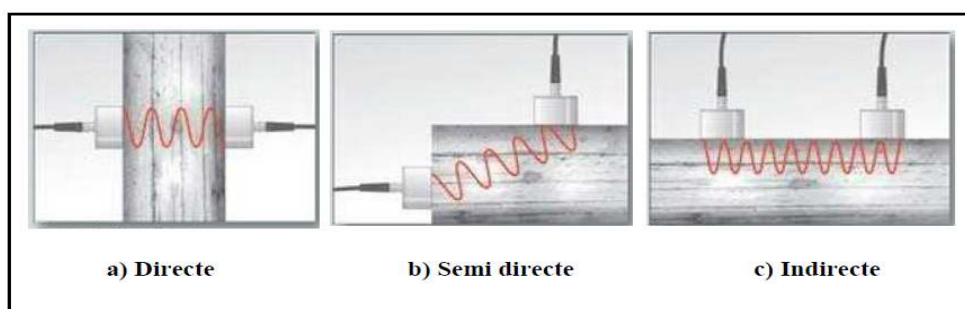


Figure 1.27: Configurations des transducteurs pour la mesure de la vitesse ultrasonique.

1.5.5. Le fluage

Le fluage est la déformation qui croît dans le temps sous une charge constante. Lors d'un essai sur éprouvette de matériaux cimentaires maintenue sous charge constante.

1.5.5.1. Effet de la cure sur le fluage

L'effet de la cure sur le fluage est donc en grande partie lié au degré d'hydratation du système au moment du chargement, et donc à la perméabilité et la résistance. L'autre effet est l'état d'humidité au moment du chargement. L'effet de la cure est probablement limité, car sur de larges éléments structuraux, le volume du béton affecté par une mauvaise cure

est limité à la surface. Le fluage peut être réduit par chargement quand une résistance appropriée a été atteinte. Une plus grande résistance devrait être spécifiée si un chargement précoce est nécessaire [14].

1.5.6 Le développement durable

Dans le contexte de l'activité humaine, le développement durable est décrit comme l'activité ou le développement « répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins » (Commission mondiale sur l'environnement et le développement [CMED] 1987).

Trois catégories générales de besoins et d'impacts sont généralement considérées : environnementales, économique et sociale. Ensemble, les trois catégories forment une approche triple « triple bottom line » [64] du développement durable. Aucune catégorie ne devrait être sous ou surévalué, mais plutôt un équilibre entre les trois doit être trouvée.

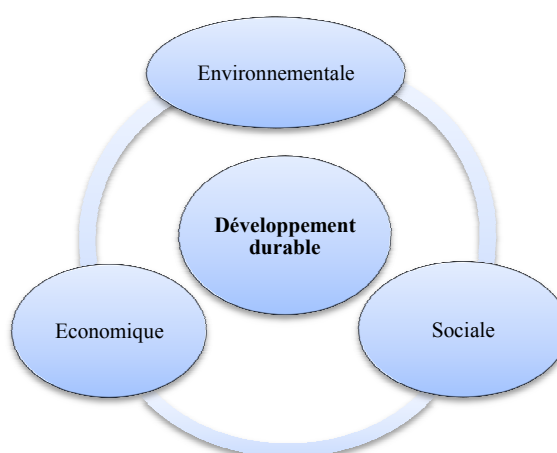


Figure 1.28: Représentation du développement durable de « triple bottom line » [64].

1.5.6.1 La cure et le développement durable

L'impact de la cure peut être discuté sur le plan du développement durable pour les trois catégories.

- ❖ Le coût de la cure est relativement faible, tandis que les avantages pour le développement durable sont grands : si la cure a un impact sur la performance, il est probable qu'elle soit sur la potentielle durabilité du mélange, et donc sur la longévité de la structure : les implications financières d'une défaillance prématurée sont énormes.

- ❖ Les avantages environnementaux de la cure sont encore liés à la longévité du système. Les impacts sont tributaires de l'approche utilisée pour la cure. Si l'utilisation de l'eau en abondance est la méthode de choix, alors des questions doivent être adressées à propos de l'élimination de l'eau par la suite. Si des produits de cure sont utilisés, alors le type et l'impact du transport, des matériaux (eau, matériaux volatils ou organiques), doivent être inclus dans l'évaluation de l'ensemble du système. La quantité de matériaux utilisés est relativement faible ; par conséquent, les conséquences devraient aussi être faibles.
- ❖ L'impact social comprend, une fois de plus, la durée de vie potentielle de la structure ainsi que les effets sur la santé des travailleurs qui appliquent des composés sur la surface du béton [14].

1.6. Impact de la cure sur les performances des BAP

1.6.1. Le béton autoplaçant

Le béton autoplaçant est un béton fabriqué à partir de sable, gravillons (≤ 20 mm), un ciment, des adjuvants et des additions minérales, plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment : La méthode générale (Japon) par OKAMURA, formulation CBI (Suède), formulation LCPC (France)

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité) [66].

1.6.2. Principe et critère de formulation

Il existe de très grandes variétés de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle du béton autoplaçant. Chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance). Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr ; sur la méthode de formulation choisie et des performances souhaitées.

Pour l'optimisation de la formulation des BAP, plusieurs approches ont été conçues à savoir : l'approche japonaise d'Okamora (1999), l'approche française LCPC, l'approche suédoise du CBI par **Petersson et al.** [67] qui est basée sur le plan d'expérience et celle d'OH et al. [68] qui repose sur la théorie de l'excès de pâte [66]. Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP, mais peuvent légèrement varier d'une approche à l'autre. La formulation des BAP repose sur trois critères.

- Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice) [69]

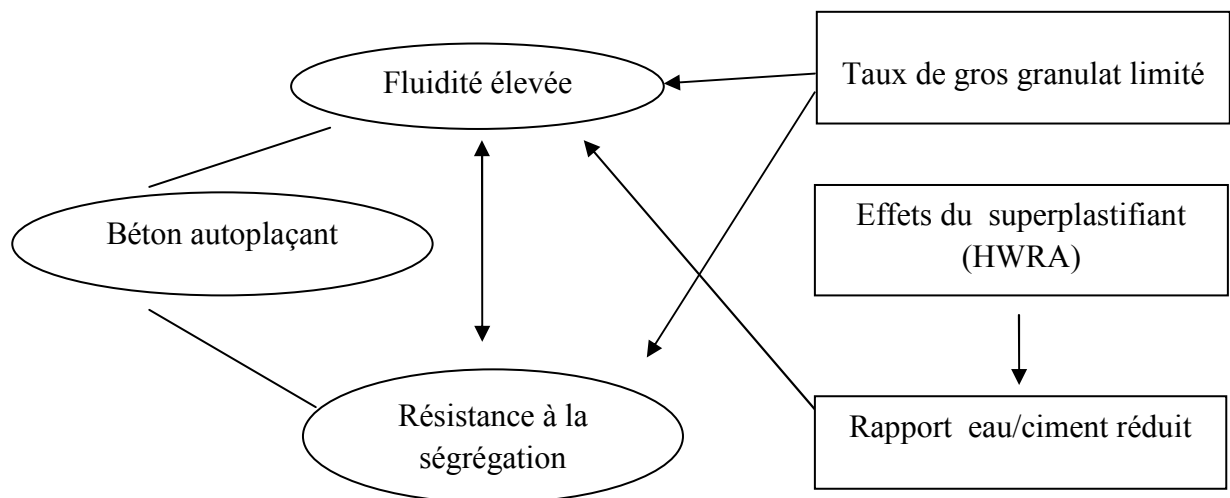


Figure 1.29: Concept de formulation des BAP [70].

1.6.3. Propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais

Les BAP sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- La fluidité : elle caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant sans aucune tendance à la ségrégation et avec une viscosité élevée.

- L'homogénéité : le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses, et remplir les moindres recoins de coffrage en gardant son homogénéité.

Les propriétés essentielles proposées pour caractériser le BAP à l'état frais sont :

- La capacité au remplissage : c'est l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement.
- La capacité de passage : c'est la capacité du mélange du béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage.
- La résistance à la ségrégation : c'est la séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre du BAP [71]. D'où la résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité du BAP sur site.
- La rhéologie : elle étudie l'écoulement des BAP à l'état frais. Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle de Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps. L'affaissement donné par l'essai au cône d'Aabrams est relié au seuil de cisaillement [68]. Les mesures réalisées sur les bétons montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Le matériau ne peut s'écouler que lorsque la contrainte de cisaillement dépasse une valeur minimale. Cette contrainte minimale est appelée seuil d'écoulement ou contrainte seuil.

Quelques chercheurs ont étudié les performances du BAP à l'état frais ainsi que l'influence des additions minérales sur ces performances.

Boukedakdji [72] a constaté que l'étalement du BAP sans ou avec le J-Ring augmente avec l'augmentation du pourcentage du laitier dans le béton. Donc on peut dire que l'étalement est aussi influencé par le type et le pourcentage d'ajout utilisés.

Borsoi et al [73] ont montré que l'ouvrabilité du BAP à base de laitier ou à base de laitier et de cendres volantes est meilleure que celle du BAP à base des cendres volantes seulement.

1.6.3.1 Essai d'étalement (Slump Flow)

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son propre poids. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant [70].

La fluidité des BAP en milieu non confiné peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement). C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette du béton sur deux côtes perpendiculaires [68].

Les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 600 à 750 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance) [71].

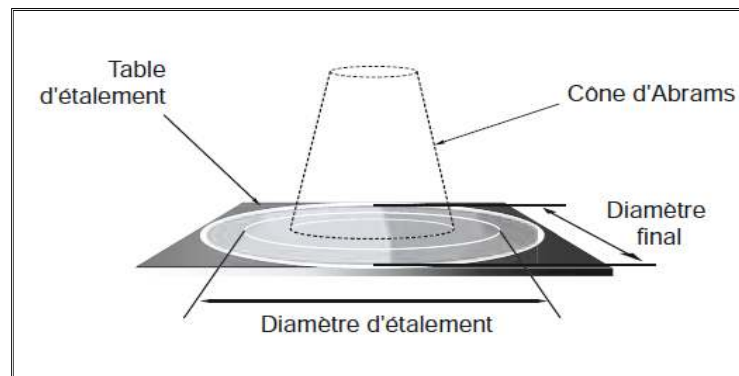


Figure 1.30: Essai d'étalement au cône (slump Flow) [76].

1.6.3.2 Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L permet de tester 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 blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure 1.25. La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 . Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation [71].

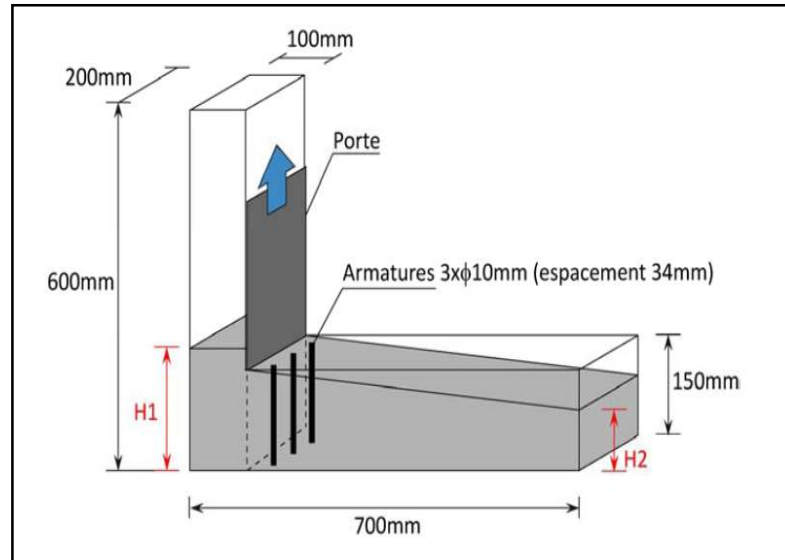


Figure 1.31: Essai de la boîte en L [76].

1.6.3.3 Essai de V funnel

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant, 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 1.32). Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [76].

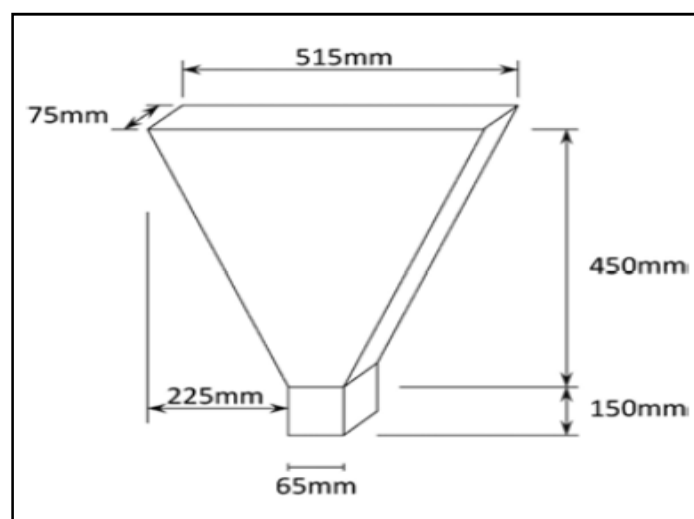


Figure 1.32: Schématisation de l'Essai de l'entonnoir (V funnel) [76].

1.6.3.4 Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Ce test consiste à disposer 10 litres du béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg du béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{\text{masse de laitance}}{\text{masse de l'échantillon}}$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0 % < % Laitance < 15 % : Stabilité satisfaisante
- 15 % < % Laitance < 30 % : Stabilité critique
- % Laitance > 30 % : Stabilité très mauvaise [76].

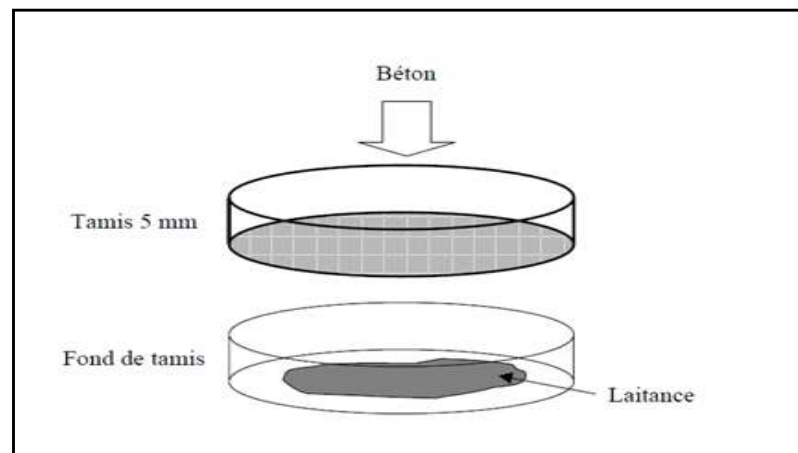


Figure 1.33: Schématisation de l'essai de stabilité au tamis [76].

1.6.4. Influence de la cure sur les performances des BAP

1.6.4.1 État frais

Une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau. Les BAP ne nécessitent pas d'opération de surfacage pour les applications horizontales. Leurs performances à l'état frais autorisent leur pompage sur de longues distances et de nouvelles possibilités de mise en œuvre [14].

Le béton frais doit être protégé pendant un temps suffisant, après la mise en œuvre pour éviter un départ trop rapide d'eau qui se traduirait, non seulement, par des variations dimensionnelles importantes pouvant amorcer l'apparition de fissures, mais aussi par une hydratation incomplète du ciment [77, 4, 78].

D'où la nécessité de protéger du béton frais, surtout avant la prise où il est sujet à d'importantes déformations [33]. La qualité des premiers centimètres du béton, d'une part, est essentielle pour des raisons d'esthétiques et/ou de durabilité [75].

Nader et Hamidou [79] ont montré que la performance du béton autoplaçant à l'état frais est affectée par les températures chaudes et froides. À des températures élevées, l'influence s'est manifestée sous la forme d'importante diminution de l'ouvrabilité en milieu ouvert, augmentation importante du débit ou de la viscosité plastique par inférence, et l'amélioration de la stabilité dynamique des BAP frais.

Le changement des propriétés du béton frais est dû à l'élévation ou la diminution de la température qui peuvent être caractérisées par la quantité d'adsorption de mélange par la surface spécifique de la pâte du béton ($A_{ds}/SSAP$), l'évolution de la teneur en humidité de l'agrégat et l'évaporation partielle de l'eau du mélange dans le cas d'élévation de la température [79]. L'influence de la température sur l'étalement est donnée par la figure 1.34.

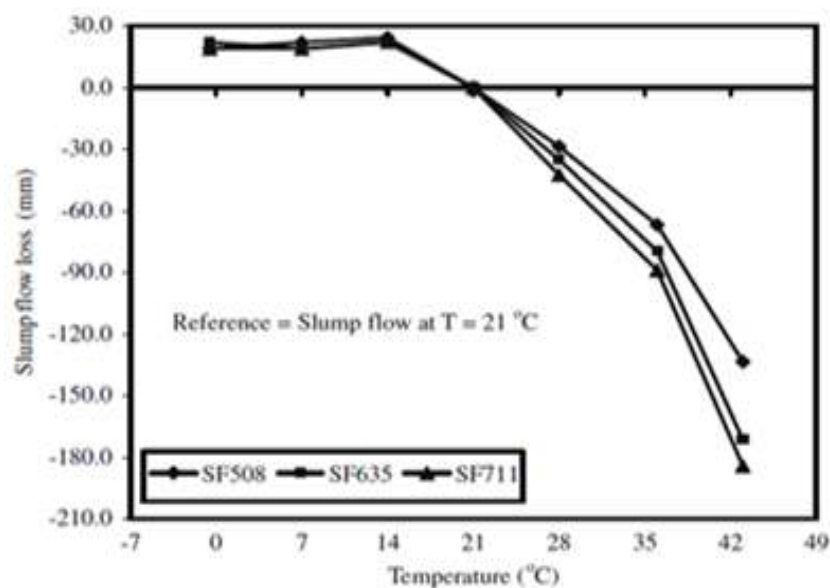


Figure 1.34: Influence des températures chaudes et froides sur étalement des BAP [71].

1.6.4.2 État durci

a. Résistance à la compression

Aïcha [80] a pu constater, d'après les résultats moyens obtenus sur des éprouvettes prismatiques pour les différentes cures (20, 30 et 40 °C), une tendance similaire à celle du degré d'hydratation présentée, auparavant pour la même plage de températures Figure 1.35, ce qui est attendu du fait que l'hydratation contribue au développement des résistances mécaniques parallèlement à d'autres facteurs microstructuraux tels que l'évolution du réseau capillaire.

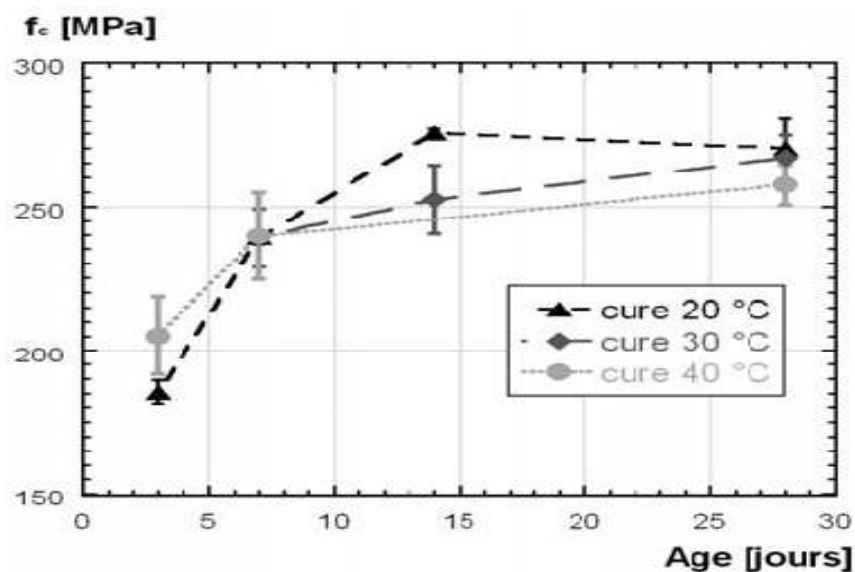


Figure 1.35: Évolution de la résistance à la compression à différentes cures [80].

Selon **Mounanga [81]**, l'influence de la température se traduit par deux effets : un effet sur la cinétique « l'accroissement de la température résulte en une accélération du processus d'hydratation et l'évolution des résistances alors que la diminution de la température ralentit le processus d'hydratation » et un effet thermodynamique « la diminution des résistances à long terme et le réarrangement des hydrates sous des températures élevées ».

Mohamed [82] a analysé l'effet de cure dans l'eau (7 et 28 jours) et à l'air sur la résistance à la compression du béton autoplaçant dosé à 450 et 550 kg/m³ pour les mélanges à base de cendres volantes, laitier, et soit un ciment type I soit un ciment type II (Figs. 1.36 à 1.39).

Elle a observé que le BAP avec 10 % de cendres volantes et 10 % de fumée de silice comme substituant a donné la plus grande valeur de résistance du béton à la compression. La plus grande valeur de résistance à la compression pour tous les cas de test est obtenue à

partir des éprouvettes durcies dans l'eau pendant 28 jours et la valeur la plus faible est obtenue pour les échantillons qui ont été conservés à l'air libre [82]. Les BAP avec 15 % de fumée de silice donnent des valeurs plus élevées de résistance à la compression que ceux contenant 30 % de cendre volante. Les éprouvettes durcies dans l'eau pendant 28 jours donnent les plus grandes valeurs de résistance à la compression.

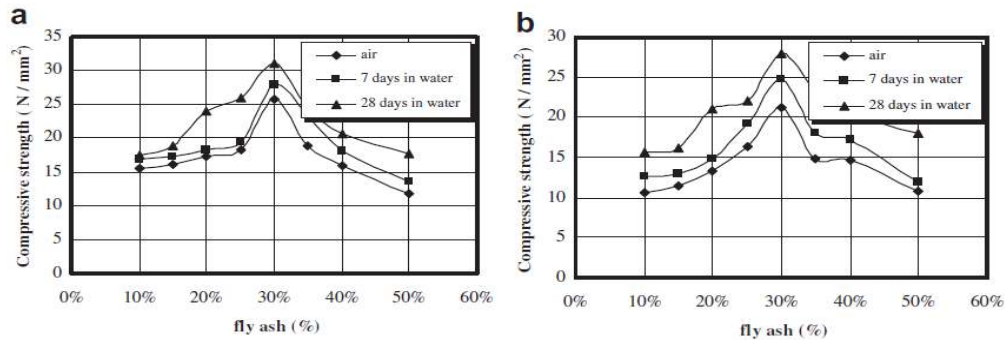


Figure 1.36: Résistance à la compression de type I: (a) dosage en ciment = 550 kg/m³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m³ [79].

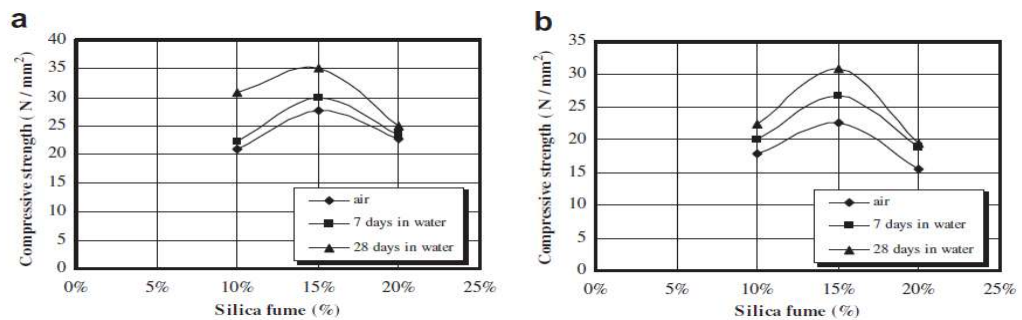


Figure 1.37: Résistance à la compression de type II : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m³ [79].

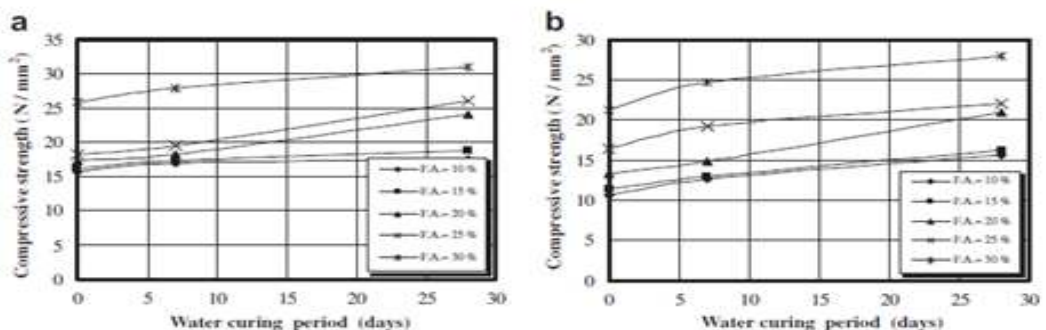


Figure 1.38 : Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type I : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m³ [79].

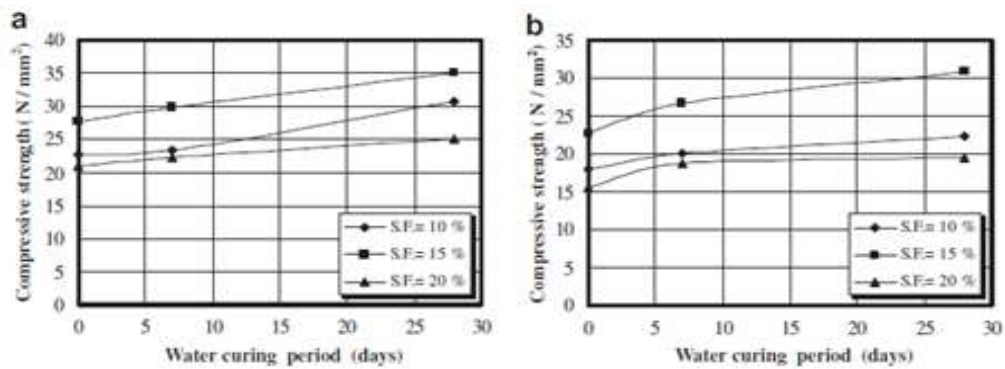


Figure 1.39: Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type II : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m³ ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m³ [79].

Ibrahim et Abdulhamit [74] ont montré que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans l'eau est plus grande que ceux du béton conservé dans les autres conditions (Fig. 1.40).

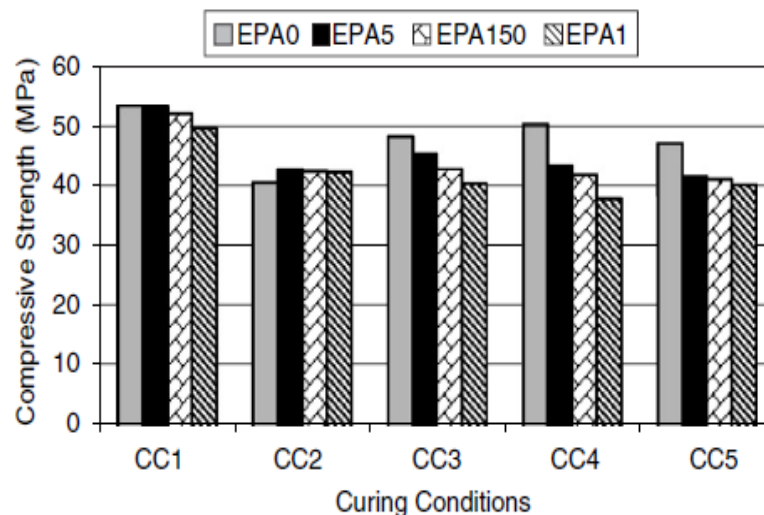


Figure 1.40: Résistance à la compression des éprouvettes du béton selon le pourcentage d'EPA et les conditions de cure [74].

D'après Hui Zhao et al. [83], le développement des résistances à la compression des BAP après une période initiale de cure varie de 33,8 MPa à 36,4 MPa ; 50,2 MPa à 52,6 MPa et de 57,9 MPa à 63,3 MPa pour une période de cure de 3, 7 et 28 jours respectivement (Fig. 1.41). Les BAP avec une durée de cure de 7 jours et dans des conditions de cure FR (T=28°C et HR=85%) ont un taux de gain de résistance à la compression très élevé.

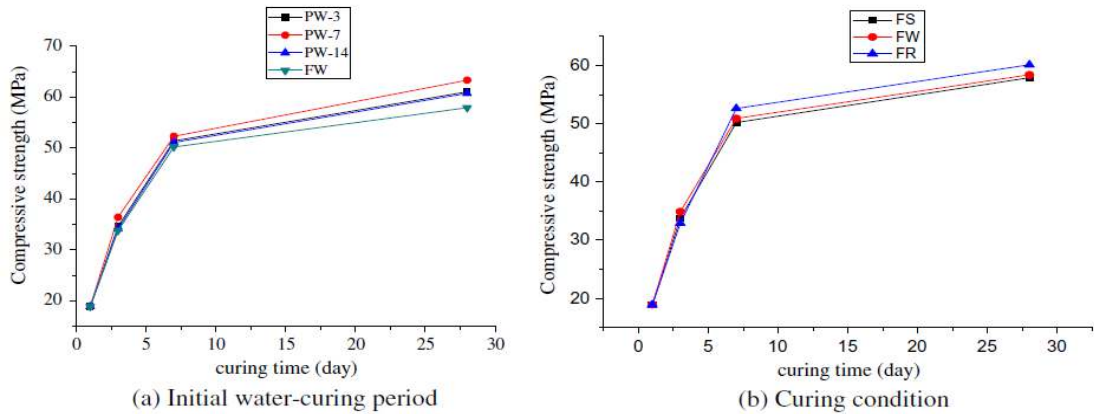


Figure 1.41: Développement de la résistance à la compression des BAP, dont la cure initiale dans l'eau et dans de différentes conditions de cure [83].

Selon **Kazim T et al. [84]**, les résistances à la compression et à la traction des bétons autoplaçants avec ($E/C=0,38$) étaient plus élevés que ceux du béton ordinaire avec ($E/C=0,58$) pour tous les âges de test et pour toutes les conditions de cure (Figure 1.42).

Les BAP contenant de la fumée de silice comme substituant au ciment a donné des valeurs plus élevées de résistance à la compression par rapport aux bétons contenant les cendres volantes. Pour tous les bétons, les échantillons conservés dans l'eau ont les plus grandes valeurs de résistance à la compression suivies par les échantillons qui sont durcis sous d'autres conditions.

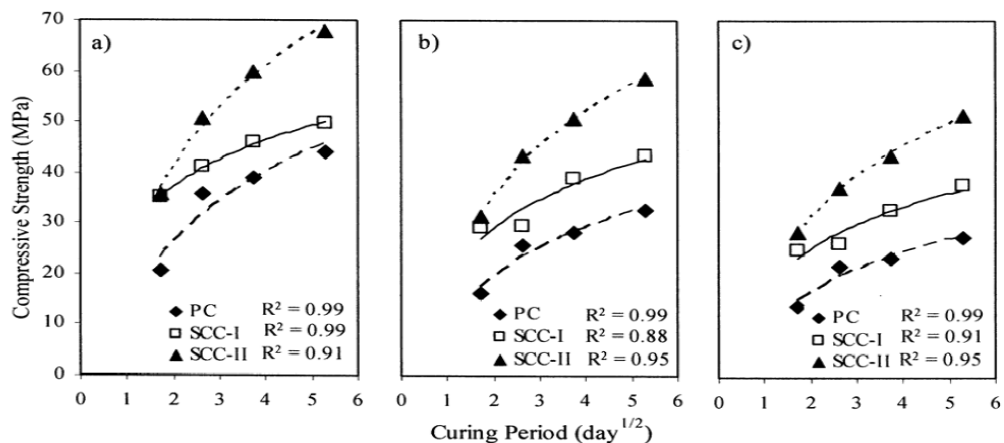


Figure 1.42: Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau (b) couvert et (c) air [84].

En outre l'humidité relative interne inférieure à 80% provoque un arrêt de la réaction d'hydratation [104], alors que la température accélère la réaction d'hydratation qui entraîne

une augmentation de résistance à court terme et une diminution à long terme comme le montre la figure 1.43.

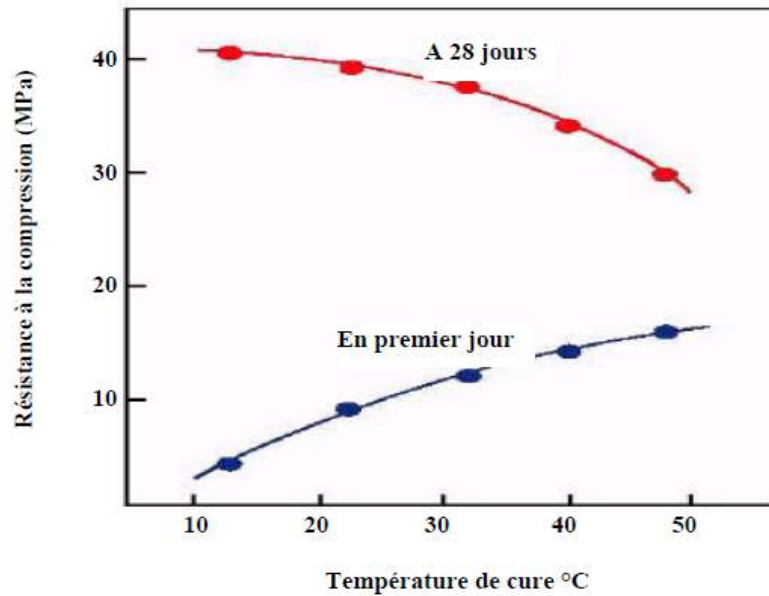


Figure 1.43: Influence de la température de cure sur l'évolution de la résistance d'un béton au jeune âge et à 28 jours [104].

b. Perméabilité à l'eau

Selon **Hou et al [85]** l'invasion de substances nocives dans le béton est une question de fluidité. Ceci est gouverné par la loi de Darcy. La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux dimensions des pores dans le mélange, plus les pores sont larges plus grande est la perméabilité. Si le rapport Eau/Ciment est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores capillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible. Pour les bétons contenant du laitier, les pores capillaires (diamètre supérieur à 100 Å) sont transformés en pores gellives (diamètre inférieur à 100 Å), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton.

La perméabilité à l'eau dépend des paramètres de la composition, le ciment (type et classe), les types des fillers (cendres volantes, fillers de calcaire), le rapport ciment/fine, le rapport E/C, ainsi que la quantité d'eau et la quantité des fines (ciment et fillers) (Figure 1.44) [86]. La porosité elle-même est influencée par la teneur en eau du béton, d'où le rapport E/C.

D'après **Perraton et al [87]**, lorsque le rapport E/C augmente la porosité devient plus grande et la structure poreuse plus grossière. Par conséquent, les transferts de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie.

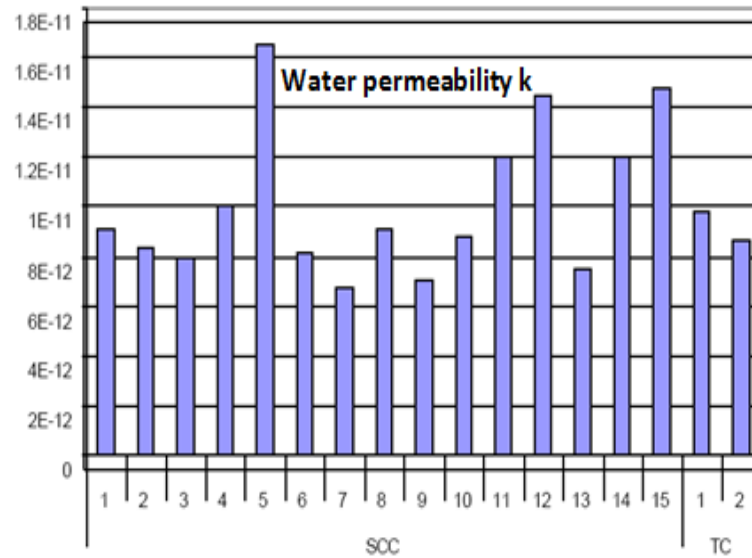


Figure 1.44: Perméabilité à l'eau [86].

Al-Khaiat et Haque [104] ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau est beaucoup plus sensible à la mesure de cure initiale de SLWC (Structural lightweight concrete). Alors que la résistance à la compression des éprouvettes exposées à des conditions ambiantes au bord de la mer était plus élevée que celles conservées dans l'eau. Leur pénétration à l'eau a presque doublé lorsque la cure initiale était de 1 jour. Ces résultats indiquent l'importance de la cure initiale des structures côtières.

Tableau 1.4: La résistance et les caractéristiques physiques de SLWC [104].

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

Jooss et Reinhardt [105] ont observé que la perméabilité augmente de 13 à 62% lorsque la température est augmentée de 20 à 50° C et 3 à 55% pour une augmentation de 80° C (Fig. 1.45).

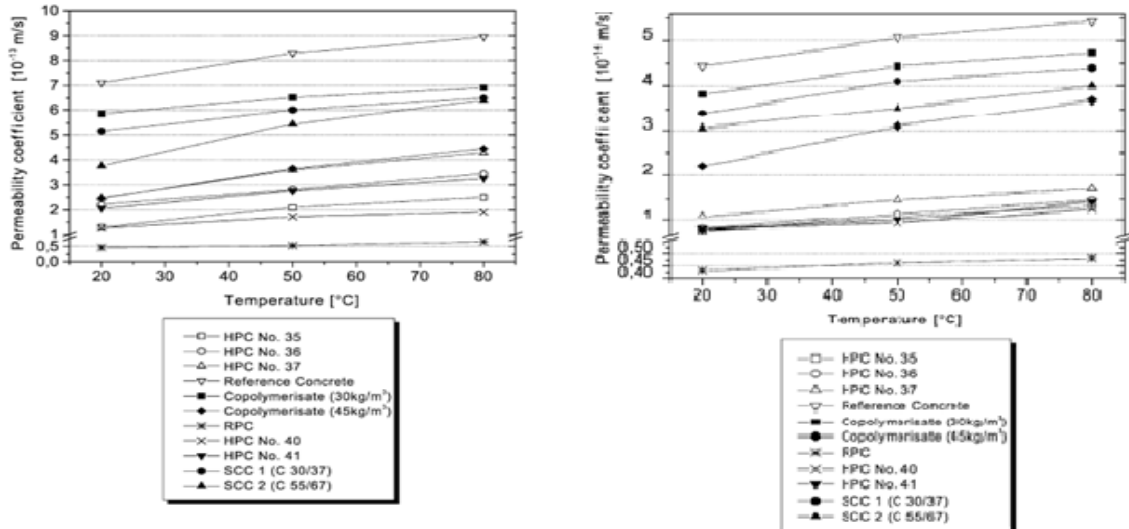


Figure 1.45: Coefficient de perméabilité en fonction de la température, pendant 1 h et 48h [105].

Berhane [106] a trouvé qu'au-dessus d'une certaine limite, un taux élevé d'évaporation diminuera la maniabilité et peut entraîner une fissuration par retrait plastique, qui à son tour engendrera des effets négatifs sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

1.7 Conclusion

L'analyse bibliographique a montré que la cure a un effet positif sur les différentes propriétés du béton, elle nous a aussi permis de voir l'impact des facteurs climatiques (en particulier la température élevée et l'humidité relative) sur les performances du béton à l'état frais et durci, aussi une attention particulière est à donner à la cure humide du béton, car une durée suffisante de cure à jeune âge peut assurer une bonne qualité du béton.

Enfin, l'incorporation des additions minérales comme le laitier améliore les propriétés des BAP à l'état frais et durci à long terme.

CHAPITRE 2**MATERIAUX ET ESSAIS**

CHAPITRE 2: MATÉRIAUX ET ESSAIS

2. 1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes de formulation adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche.

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

2. 2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont locaux et naturels. Tous les bétons avec les différentes substitutions du laitier 15 et 25 % sont été réalisés avec les mêmes matériaux.

2.2.1 Ciment

Le type de ciment utilisé dans cette étude est du type CEM II/A-L 42.5, « une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa ». Fabriqué par la cimenterie Lafarge d'oggaz à mascara en Algérie. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées dans le tableau 2.1 :

Tableau 2.1: Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment.

Composition chimique (%)									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	RI
63,40	21,06	3,60	4,47	1,85	2,00	0,13	0,57	2,53	0,65
Composition minéralogique (%)									
C₃S		C₂S			C₃A		C₄AF		
67,40		9,89			1,98		13,59		

Les essais physico-mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida, dont les résultats d'identification sont donnés dans le Tableau 2.2 :

Tableau 2.2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

f_{c28} (MPa)	ρ_{abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	SSB (cm ² /g)	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
45.50	3040	1050	3000	2h50	4h36



Figure 2.1: Ciment du type CEM II/A-L 42.5.

2.2.2 Les Granulats

2.2.2.1 Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est un mélange de deux sables : le premier sable provenant de la région de Baghlia de wilaya de Tizi-Ouzou et le deuxième provenant de la région de Bougezoul de wilaya de Médéa. La correction du sable a été faite dont le but d'avoir un sable corrigé qui a un module de finesse moyen de 2.51. Les caractéristiques de ces sables sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé.

Sable	Baghlia	Boughezoul	Corrigé
Classe granulaire (mm)	0/3	0/5	Mélange
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1529	1663	1585,87
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	2609	2703	2680
Coefficient d'absorption (%)	1,55	1,01	2,1
Composition (%)	42,25	57,75	100
Humidité (%)	1,33	1.94	0,79
Équivalent de sable visuel (%)	70,35	85,9	79,85
Équivalent de sable au piston (%)	67,33	81,97	76,87



Figure 2.2: Sable de Baghlia (a), Sable de boughezoul (b).

2.2.2.2 Le Gravier

Deux types de graviers ont été utilisés pour la confection des bétons étudiés. Ils présentent respectivement une granulométrie 3/8 et 8/15 (Figure 2.3). Les deux graviers provenant de carrière de Setif. Leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau 2.4, ainsi que les courbes granulométriques du sable et du gravier utilisés sont données dans la figure 2.4.

Tableau 2.4: Caractéristiques physiques de gravier.

Granulats	Classe granulaire (mm)	$\rho_{app}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{abs}(\text{kg/m}^3)$	Humidité (%)	Coefficient d'absorption (%)
Gravier	3/8	1358	2727	0	0,855
	8/15	1422	2727	0.26	1,345

$\rho_{abs}(\text{kg/m}^3)$: Masse volumique absolue.

$\rho_{app}(\text{kg/m}^3)$: Masse volumique apparente.



Figure 2.3: Gravier 8/15 (a) et 3/8 (b) de Setif.



Figure 2.4: Tamiseuse à vibrations de laboratoire.

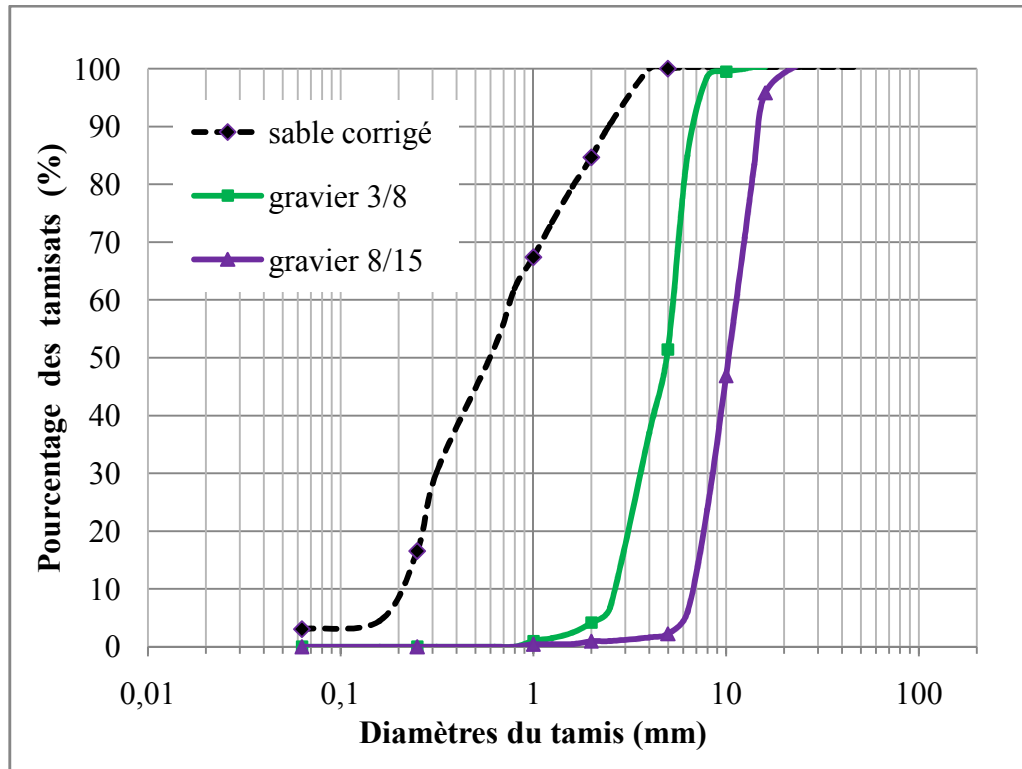


Figure 2.5: Courbe granulométrique du sable et gravier naturel.

Tableau 2.5: Module de finesse du sable corrigé.

Granulats	Sable corrigé	Spécifications
Module de finesse M_f	2.51	$2.8 < M_f < 3.2$: Sable grossier $2.2 < M_f < 2.8$: Sable moyen $1.8 < M_f < 2.2$: Sable fin

2.2.3 Le laitier

Dans notre étude nous avons utilisé le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, Wilaya d'Annaba comme addition. Le laitier est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair (Figure 2.6).



Figure 2.6 : : Laitier granulé de haut fourneau utilisé (a) avant broyage, (b) après broyage.

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions de BAP, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 50 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite complètement broyé dans un broyeur à boulets (Figure 2.7) d'une capacité de 5 kg et la quantité finale de laitier obtenue après le broyage a été mélangé dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Dans notre étude, on a fixé une seule finesse qui égale à $3500\text{cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique apparente du laitier est de $1069,15\text{ kg/m}^3$ et sa masse volumique absolue est 2850 kg/m^3 .



Figure 2.7 : Broyeur à boulets utilisé.

L'analyse chimique de laitier est montrée dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 : L'analyse chimique de laitier d'El Hadjar

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
(%)	40,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20

Le laitier granulé de haut fourneau utilisé dans notre étude expérimentale est un silico-aluminate de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui sont : (SiO₂-Al₂O₃— CaO-MgO).

Les indices de basicité «*M_b*» indiquent si un laitier est basique ou acide. Les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$M_{b1} = \frac{\% \text{ CaO} + \% \text{ MgO}}{\% \text{ SiO}_2} = 1,17 \quad (2.1)$$

$$M_{b2} = \frac{\% \text{ CaO}}{\% \text{ SiO}_2} = 1,05 \quad (2.2)$$

$$M_{b3} = \frac{\% \text{ CaO} + \% \text{ MgO}}{\% \text{ SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} = 1,01 \quad (2.3)$$

Pour notre cas l'indice de basicité du laitier (*M_b* > 1), donc le laitier est basique.

Parmi les facteurs qui influent sur le pouvoir hydraulique du laitier granulé sont en général au nombre de trois :

- ✓ la composition chimique (elle nécessite des quantités suffisantes en chaux et en alumine),
- ✓ le degré de vitrification (dissolution des produits amorphes),
- ✓ la surface spécifique (surface de contact eau-laitier).

L'indice hydraulique (taux ou degré de vitrification : la richesse du laitier en éléments silicatés) sert d'indication de l'activité hydraulique du laitier de haut fourneau, est cette dernière calculée par la méthode de Keil selon la formule suivante :

$$\alpha = \frac{S_p \times F}{1000} \quad (2.4)$$

Avec :

S_p : Surface spécifique de Blaine des fines du laitier,

F : pourcentage des fines du laitier.

Tableau 2.7 : indice d'Activité hydraulique du laitier granulé [109].

Classe	L'indice hydraulique α	Type de laitier
1	$\alpha < 15$	Laitier très pauvre
2	$15 < \alpha < 40$	Laitier pauvre
3	$40 < \alpha < 55$	Laitier acceptable
4	$55 < \alpha < 85$	Laitier bon
5	$85 < \alpha < 100$	Laitier très bon
6	$\alpha > 100$	Laitier excellent

Le laitier granulé d'El-Hadjar a un coefficient α moyen de 44 (laitier acceptable).

2.2.4 Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants soient au plus 2 % du poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air). La compétition entre l'effet de défloculation et le ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition interfaciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère [110].

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

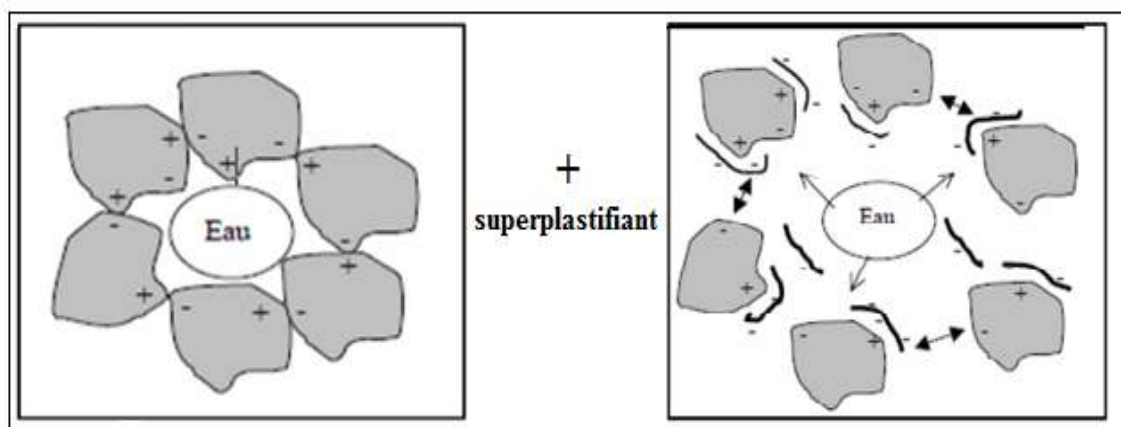


Figure 2.8 : Modes d'action des superplastifiants — défloculation des grains de ciment.

Le superplastifiant utilisé pour les mélanges de béton est un superplastifiant de la nouvelle génération que sont les polycarboxylates. Les polycarboxylates sont des molécules ayant un double effet pour la dispersion des particules [111].

Dans notre étude le superplastifiant MEDAFLOW 30 de la société Granitex a été utilisé, ce dernier est un produit adapté pour les applications des BAP. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.8: Quelques caractéristiques de MEDAFLOW 30.

Caractéristique	Forme	couleur	pH	densité	Teneur en chlore	Dosage
Résultat	Liquide	Brun	6.5	1.07 ± 0.01	< 1 g/l	0,5 % à 2 %

Pour plus d'information, voir la fiche technique dans l'annexe A.

2.2.5 L'eau de gâchage

Pour la confection des mortiers et bétons, nous avons utilisé de l'eau du robinet exempte d'impuretés.

2.3 Méthodes de caractérisation du BAP à l'état frais

2.3.1 Formulations adoptées

Le béton autoplaçant présente une difficulté particulière pour sa formulation et sa caractérisation. En effet, il doit concilier deux propriétés, à priori contradictoires, à savoir la fluidité et l'absence de ségrégation et de ressuage. Il doit satisfaire à plusieurs tests pour pouvoir être qualifié d'autoplaçant.

L'objectif de cette formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport E/P, qui est fixé dans cette étude à 0.40. Le dosage en superplastifiant a été optimisé par des essais sur mortier afin d'obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable (sans ressuage). Le pourcentage du superplastifiant obtenu sur mortier a été obtenu sur béton. Le choix de ces paramètres (S/M, E/P) a été fait sur la base de travail de **Boukendakdji** dans sa thèse de doctorat

[72]. Cette formulation a été proposée initialement par les chercheurs japonais OKAMURA.

2.3.2 Formulation du mortier autoplaçant

Le but de la formulation du mortier autoplaçant est d'optimiser le dosage en superplastifiant, en gardant les rapports S/M et E/P constants ($S/M=0,50$ et $E/P=0,40$) et faire varier le pourcentage du superplastifiant de 1,20 à 2 % afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un diamètre d'étalement entre 270 et 330 mm, sans ségrégation et sans ressuage. Les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe B. La procédure du malaxage du mortier adoptée est celle de **Domone et Jin [112]** où ils proposent d'introduire le superplastifiant à partir de la 2ème minute après le commencement du malaxage (Figure 2.9).

La procédure est comme suit :

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

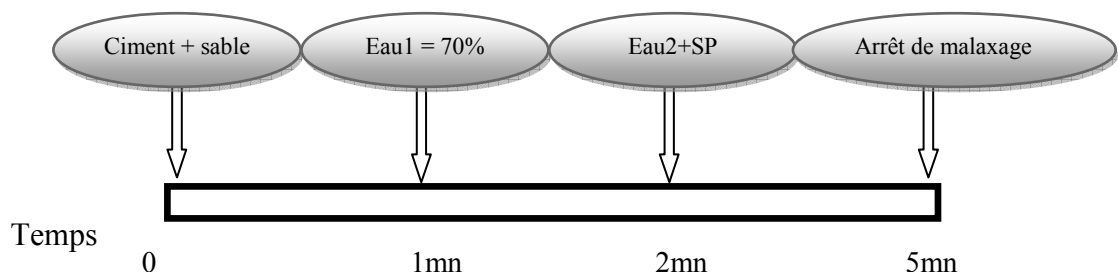


Figure 2.9: Séquence de malaxage du mortier [72].



Figure 2.10: Le malaxeur à mortier de 5 litres de capacité.

2.3.2.1 Essai de caractérisation de mortier

a. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel teste)

Le dispositif d'essai est montré dans la figure 2.11. Dans cet essai on calcule le temps d'écoulement qu'il est calculé entre le moment de l'ouverture de l'orifice et l'apparition de la lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Le temps d'écoulement doit être compris entre 2 et 10 secondes.

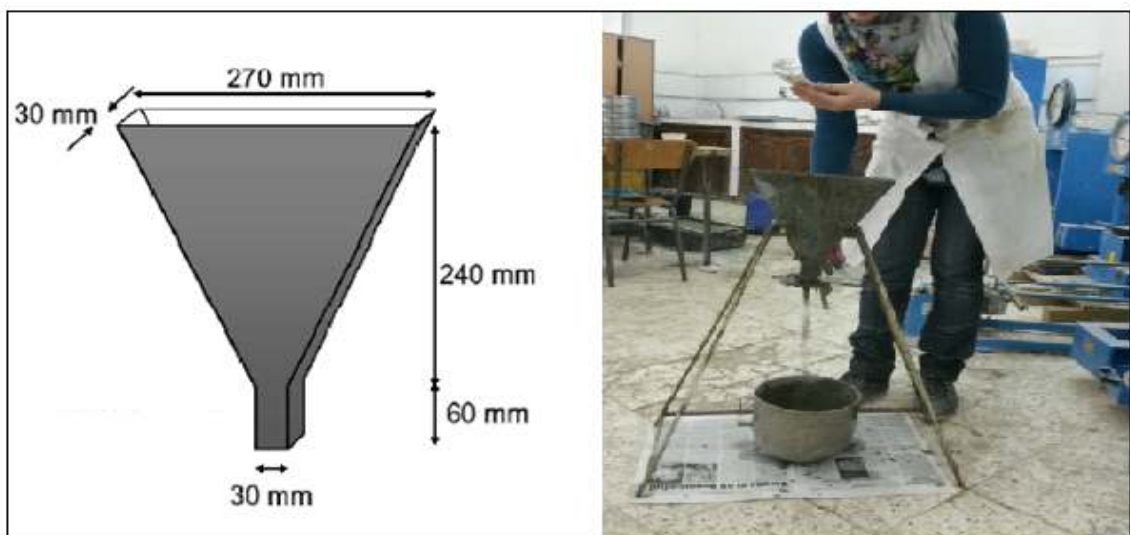


Figure 2.11: L'entonnoir en V (V- Funnel test) pour mortier.

b. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'appareil se compose d'un moule tronconique creux de 60 millimètres de hauteur, un diamètre du haut de 70 mm et du bas de 100 millimètres (Figure 2.12). Le cône est placé au centre d'une plaque en acier, et est rempli de pâte de ciment. Le cône est, ensuite, soulevé et la pâte s'école sur la table. Le diamètre de la galette du mortier doit être compris entre 270 et 330 mm pour avoir un mortier autoplacant.

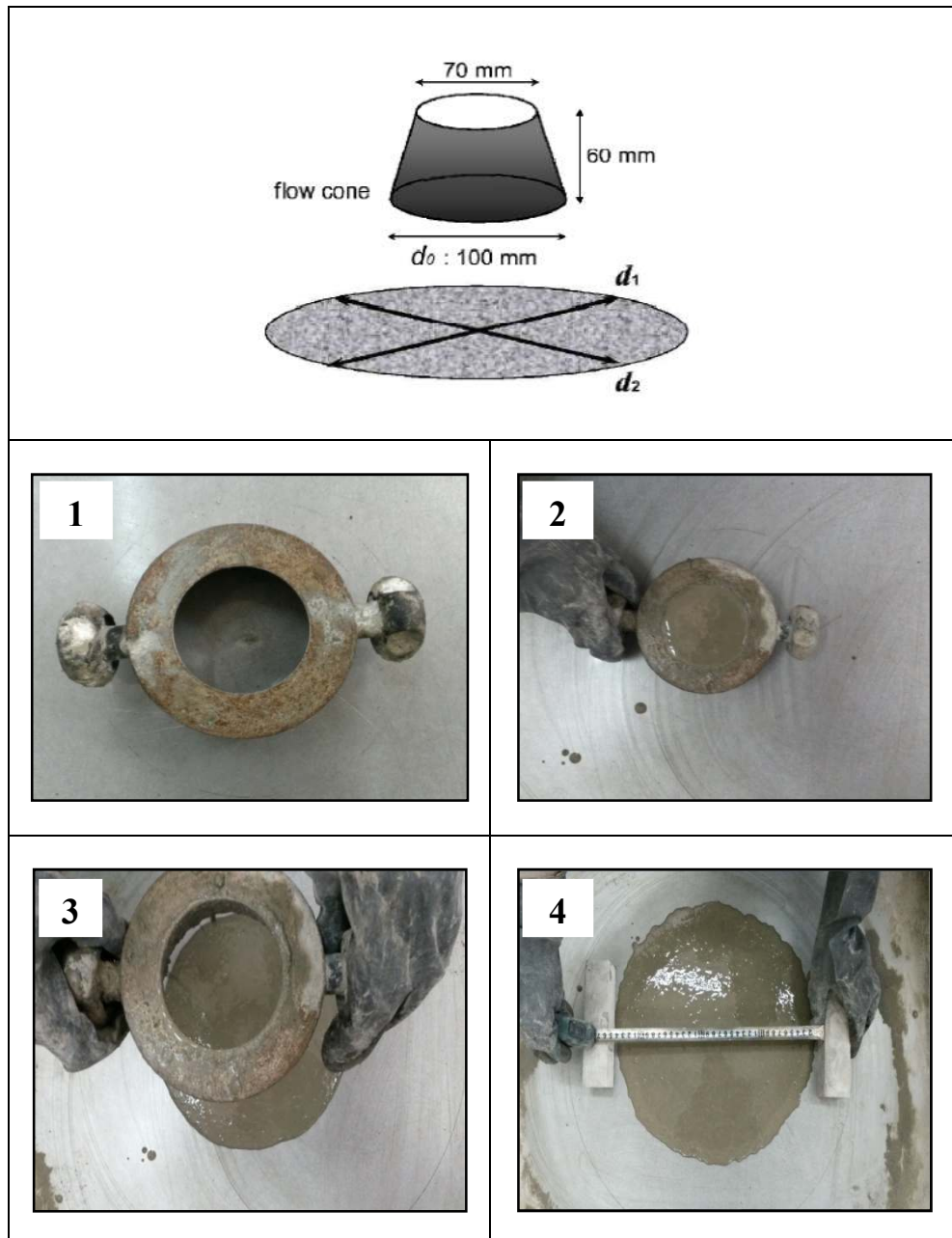


Figure 2.12: Essai d'étalement de mini cône de mortier.

2.3.3 Formulation de BAP :

La fabrication du béton a été basée sur la méthode japonaise dite la méthode générale et la formulation du béton autoplaçant est déterminée à partir d'un programme Excel Annexe C.

Trois familles ont été étudiées, à savoir un BAP sans ajouts choisis comme béton de référence et deux BAP l'un avec 15 % de laitier et l'autre avec 25 % de laitier.

Le BAP a été formulé à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport E/P constant. Le dosage en superplastifiant a été vérifié à partir des essais sur béton frais.

Une fois le béton est prêt, on procède aux essais d'ouvrabilité dans l'ordre suivant : essai d'étalement au cône d'Abrams, essai de l'entonnoir (V-Funnel), essai de la boîte en L, essai de stabilité au tamis.

La méthode du malaxage de BAP adopté est celle de **Domone et Jin [112]** comme indiquer la figure 2.13 :

- Malaxer le gravier (3/8 et 8/15), le sable, le ciment et l'ajout (laitier et/ou pouzzolane) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70 % Eau) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30 % Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

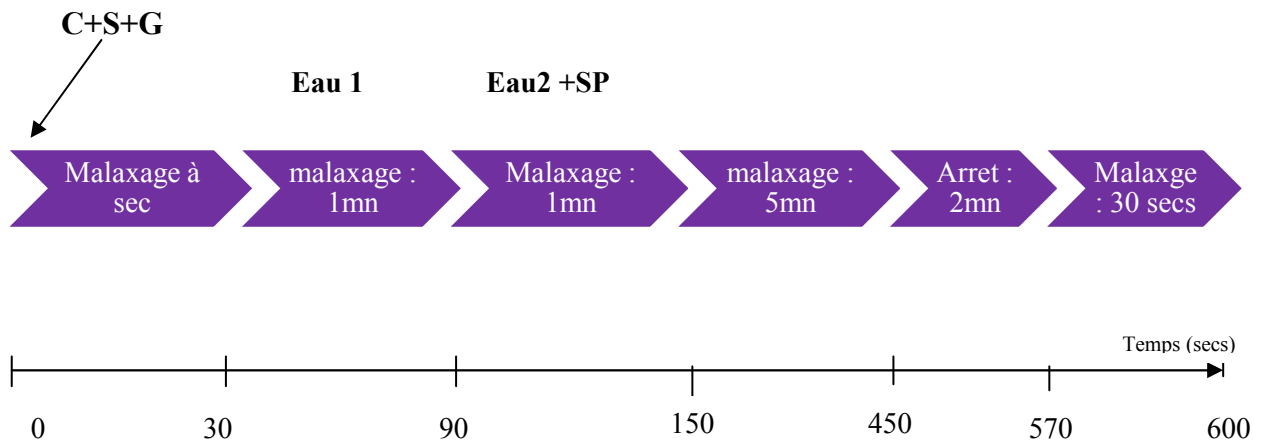


Figure 2.13: Séquence du malaxage du béton.



Figure 2.14 : Le malaxeur à béton de 40 litres de capacité.

2.3.3.1 Essai de caractérisation de BAP

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères établis selon les recommandations **AFGC [113]** ou **EFN [114]**. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude : Essai d'étalement (slump flow), Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test), et essai de L-Box et essai de stabilité au tamis.

a. Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement ou slump flow (Figure 2.15) est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- Un Plateau équipé d'une plaque métallique plane de section carrée de 90 centimètres de côté et de faible épaisseur (5 cm).
- Un cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Un mètre ou réglet de 90 centimètres.

Cet essai consiste à mesurer l'étalement au cône d'Abrams. On remplit un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée. Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton.

Enfin, cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50 cm, et qui nous renseigne sur la vitesse de mobilité du béton.

Ce type d'essai permet de donner des indications de la rhéologie des BAP en milieu non confiné.



Figure 2.15: Essai d'étalement au cône d'Abrams et principe de la mesure de l'étalement.

Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement [113].

Le principe de la conduite de l'essai est connu et est simple. Le résultat s'exprime en terme de moyenne de deux diamètres de la galette en arrondissant au centimètre supérieur :

$$\text{Étalement} = D_{\text{moy}} = SF = \frac{D1+D2}{2}$$

La recommandation d'AFGC prévoit une répartition des BAP en trois classes (Tableau 2.9).

Tableau 2.9: Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation [113].

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

b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Cet essai permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné. V-Funnel (Figure 2.16) mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée.

La procédure de cet essai est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies est rempli de béton jusqu'à arasement. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature, ce temps d'écoulement est

souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton autoplaçant.



Figure 2.16: Essai V-funnel.

c. Essai de la boîte en L

Cet essai est réalisé en utilisant une boîte de forme « L » (Figure 2.17). IL permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

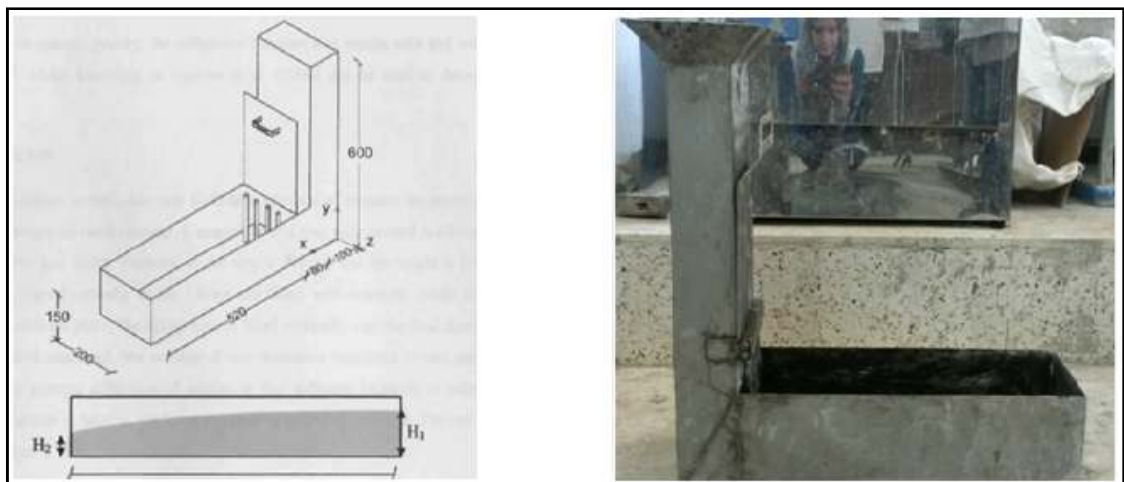


Figure 2.17: la boîte en « L ».

La partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage (figure 2.18), formé de 3 barres d'armature \varnothing 14 mm distantes de 39 mm,



Figure 2.18: Essai de la boîte en « L ».

Avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On mesure aussi la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (H1 et H2) (Figure 2.19), afin de qualifier sa capacité d'autonivellement. Le rapport $H2/H1$ devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini.

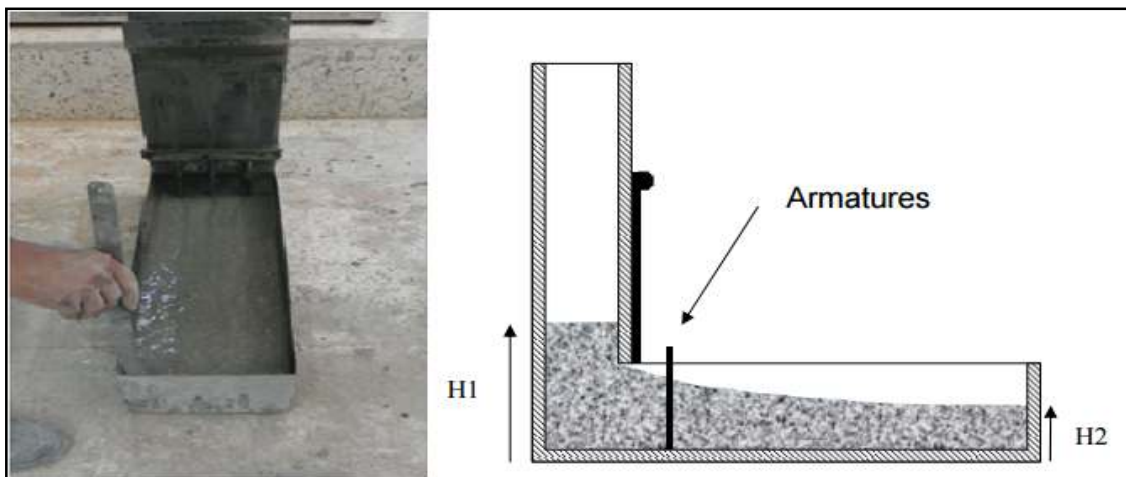


Figure 2.19: Mesure de H1 et H2.

d. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

C'est un essai caractérise la ségrégation statique des bétons autoplaçants(Figure 2.20). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation en laboratoire ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la

mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [113]. Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$ de l'échantillon sur un tamis de 5 mm avec une hauteur de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$. Après 2 min d'attente, on pèse le poids de laitance qui est passée à travers du tamis et on calcule le

pourcentage de la laitance selon l'expression:
$$\%_{Laitance} = \frac{P_{Laitance}}{P_{Echantillon}} \times 100$$

La mesure de pourcentage de laitances conduit à classer les formulations de béton autoplaçant de la façon suivante (Tableau 2.10) [113].

Tableau 2.10: Critère de stabilité [113].

Conditions	Critères de stabilité	Remarque
$0 \% \leq \pi \leq 15\%$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15 \% \leq \pi \leq 30\%$	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
$\pi \geq 30\%$	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

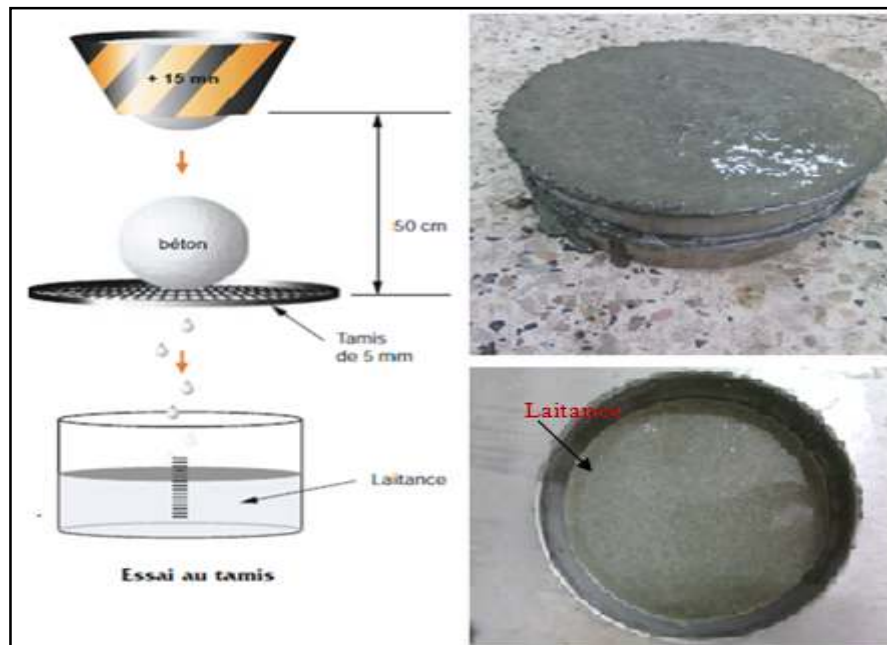


Figure 2.20: Essai de stabilité au tamis.

2.4 Méthodes de caractérisation des BAP à l'état durci

En parallèle aux essais réalisés sur le béton frais, on a réalisé également des essais sur le béton durci. Pour cela nous avons appliqué quatre types d'essais : Essai sclérométrique, essai ultrasonique, essai de résistance à la compression, et l'essai de perméabilité à l'eau.

2.4.1 Essai non destructif

Les essais non destructifs ont été effectués à l'âge de 28 et 60 jours sur des éprouvettes conservées dans différents modes de cure. Avant d'effectuer ces essais, on a appliqué sur les éprouvettes un ponçage des quatre faces moulées verticalement de chaque éprouvette à l'aide d'une pierre abrasive (Fig. 2.21) afin de les préparer aux essais non destructifs.



Figure 2.21: Ponçage des éprouvettes à l'aide de la pierre abrasive.

a. Essai ultrasonique

Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage. Pour chaque éprouvette, les essais à l'ultrason ont été effectués en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection. Sur les faces opposées de l'éprouvette, on a placé les deux transducteurs en interposant entre eux une couche mince de vaseline, puis l'enregistrement du temps de transit en micro second est réalisé (Fig. 2.23).

Le résultat d'essai à l'ultrason correspondant à chaque éprouvette est la valeur médiane de deux mesures effectuées selon les deux sens, et par conséquent la vitesse des ultrasons calculée est exprimée à 0,01 km/s près, selon la norme **NF EN 12504-4 [95]**.



Figure 2.22: Appareil de l'ultrason utilisé.

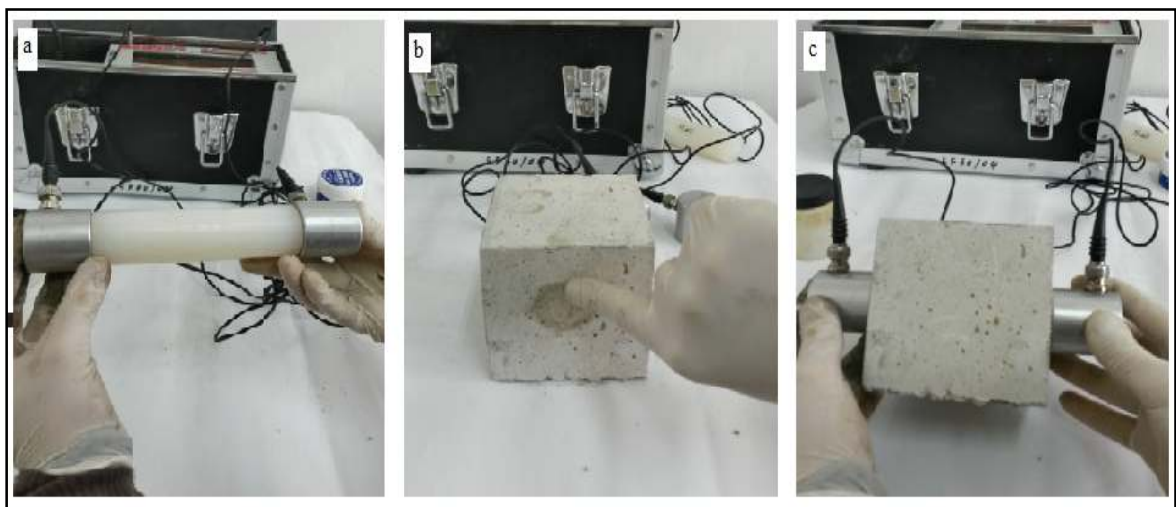


Figure 2.23: Étalonnage à l'aide du barreau de calibrage(a), Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline(b), Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores(c).

b. Essai sclérométrique

Quant aux essais au scléromètre, on a d'abord essayé toutes les traces de la graisse appliquée auparavant, puis la mise en place de l'éprouvette entre les plateaux de la presse avec lesquelles les faces moulées ont été en contact, c'est-à-dire que le sens de compression est perpendiculaire au sens de confection. Après avoir réglé la vitesse de chargement à 0.5 MPa/s (soit 5 kN/s qui correspond au cube de 10 cm), on a maintenu l'éprouvette entre les plateaux par compression sous une charge initiale de l'ordre de 15 % de la charge finale c'est-à-dire de 30 à 90 kN. Les essais au scléromètre ont été effectués à la position horizontale de l'appareil sur les deux faces opposées de l'éprouvette maintenue (Figure 2.24), qui sont au nombre de cinq par face. Alors, le résultat d'essai correspond à chaque éprouvette est la valeur médiane de l'ensemble des lectures effectuées sur les deux

faces et exprimée sous forme de nombre entier conformément à la norme européenne **NF EN 12504-2** [116].

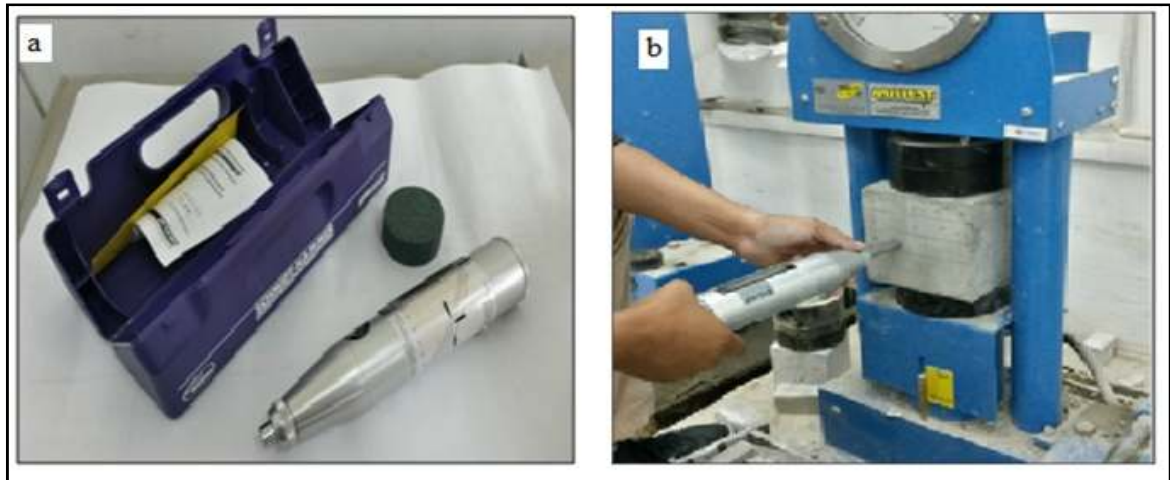


Figure 2.24 : Appareil du scléromètre utilisé(a), et mesure de l'indice de rebondissement par le scléromètre(b).

c. Essai de résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques ($100 \times 100 \times 100$) mm³ pour chaque mélange du béton à l'âge de 28, et 60 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 3000 kN (Figure 2.25). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. Conformément à la norme **NF P 18-406** [117], la vitesse de chargement est de 0.5 kN/s.



Figure 2.25: La presse de capacité de 3000 kN pour l'essai de compression simple.

d. Perméabilité à l'eau

Cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150 mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de $72 \text{ h} \pm 2$ (Figure 2.26). L'essai a été réalisé à l'âge de 60 jours sur des éprouvettes conservées dans deux différents modes de cure. La pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette. Après 24 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai brésilien, figure 2.27). À l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (Figure 2.28).



Figure 2.26: Essai de perméabilité à l'eau.



Figure 2.27: Essai brésilien.



Figure 2.28: Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.

2.5. Mode de cure

Dans notre étude, les éprouvettes ont été conservées en respectant deux modes de cure différents (Figure 2.29):

- Dans l'eau douce humide, avec 100 % de HR et $T 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- À l'air libre à l'intérieur du laboratoire après une cure humide initiale de 0, 3, 7 et 28 jours.



Figure 2.29 : Éprouvettes conservées dans l'eau douce et à l'air libre.

2.6 Les variables étudiées

Diagramme suivant résume les variables études que nous avons réalisées (Figure2.30).

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

-une cure humide dans l'eau (HR =100 % et $T=20 \pm 2$ °C) ;

-à l'air libre à l'intérieure de laboratoire de Blida pendant la période de printemps, après une cure initiale de 0, 3, 7, et 28jours.

Des essais ont été réalisés à court et à long terme, notamment les essais rhéologiques sur le BAP (Étalement, V-funnel, L-BOX et la stabilité au tamis), et la durabilité du béton (Scléromètre, Ultrason, Résistance à la compression, et la Perméabilité à l'eau

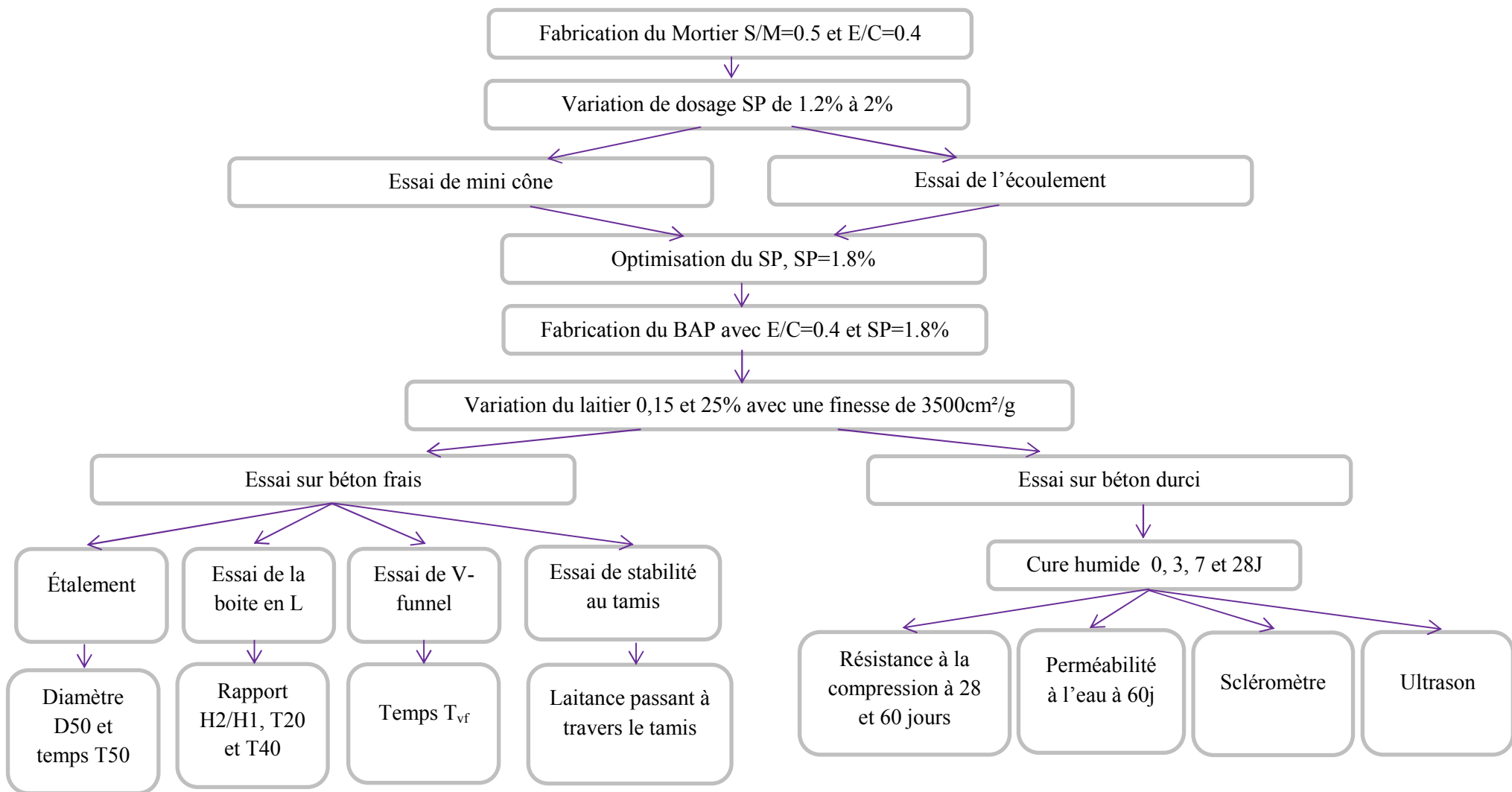


Figure 2.30 : Diagramme des différents essais

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus expérimentalement sur le mortier autoplaçant (MAP), le but étant d'optimiser le dosage du superplastifiant puis de reporter l'optimisation sur la composition du béton autoplaçant et analyser l'effet du laitier sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité du BAP dans deux modes de cure différents à l'intérieur du laboratoire à Blida : un environnement standard [$T=20^{\circ}$, H.R=100%] dans l'eau et à l'air libre, et ceci, pendant la période de printemps suite à une cure initiale de 0, 3, 7, et 28 jours.

3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant

Le superplastifiant est utilisé pour fluidifier le béton et réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorer la déformabilité, la stabilité et les propriétés mécaniques des BAP. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment floкулés et diminue ainsi les frictions intergranulaires.

L'optimisation a été faite sur la base des résultats des travaux de **Boukendakdji [72]** ; nous avons fixé le rapport E/C à 0,40 et le volume du sable à 50 % du volume total de mortier. L'objectif de cette partie est d'étudier le comportement rhéologique de mortier, afin de déterminer le dosage optimal en superplastifiant (SP/L) utilisé dans la formulation de notre BAP.

Cette optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier : la mesure d'étalement par le mini cône et la mesure du temps d'écoulement par l'entonnoir en V avec différents dosages de superplastifiants en poids de ciment (1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 et 2 %). Aussi un contrôle visuel sur l'apparition des phénomènes de ressuage et de ségrégation a été fait.

Les différentes compositions obtenues pour 1.81 litre de mortier 0 % laitier en fonction du rapport SP/L sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1: Composition des mortiers pour différentes valeurs de SP/L.

Compositions	Unité	MOR 1	MOR 2	MOR 3	MOR 4	MOR 5
Ciment	kg	1.242	1.242	1.242	1.242	1.242
Sable	kg	2.287	2.287	2.287	2.287	2.287
Eau	kg	0.516	0.515	0.513	0.511	0.509
Superplastifiant	%	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Superplastifiant	kg	0.015	0.017	0.020	0.022	0.025

3.2.1 Essai de mini cône

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers autoplacants sont présentés dans le tableau 3.2 et illustrés sur la figure 3.2

La figure 3.1 montre l'effet de superplastifiant sur le MAP. D'après cette figure on remarque que l'ajout de SP avec des pourcentages croissants augmente l'étalement de mortier, ces résultats révèlent l'existence d'un dosage optimal, le dosage de 1.6 et 1.8 de SP permet d'avoir une valeur d'étalement dans l'intervalle d'étalement des MAP définies par **Domone et Jin [111]**. En revanche, on remarque une ségrégation et un ressueage pour le dosage en SP de 2 % qui donne un étalement plus élevé à 330 mm et 1.2 et 1.4 % qui donnent des valeurs inférieures à 270 mm.

Tableau 3.2: Valeurs d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant.

Teneur en superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Étalement (mm)	197.5	245	294	305	335

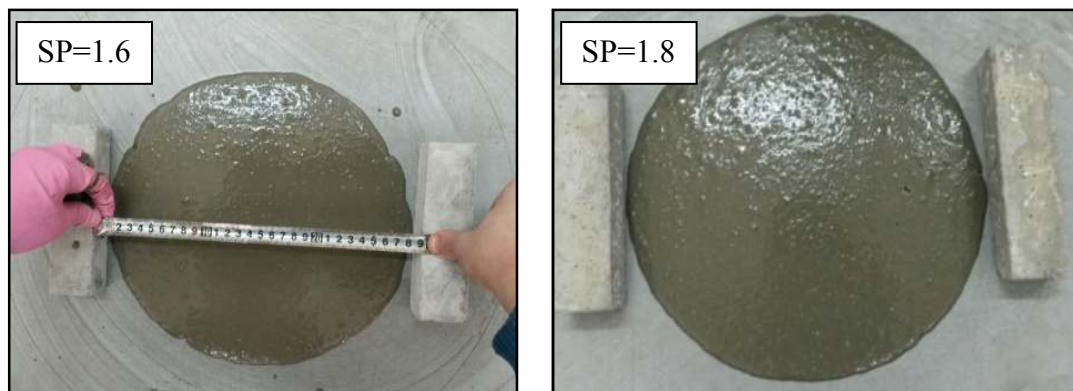


Figure 3.1 : L'étalement de mortier pour le dosage en SP = 1.6 % et 1.8 %.

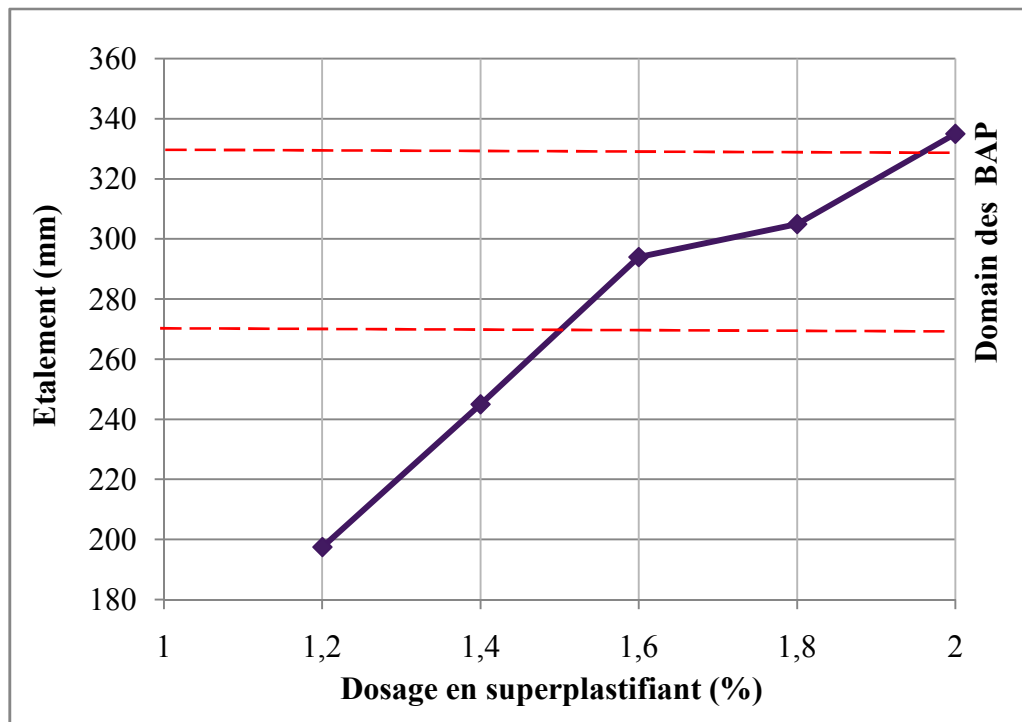


Figure 3.2: Valeurs d'étalement en fonction du dosage en superplastifiant.

3.2.2 Essai de V-funnel

Les résultats de l'effet du dosage en superplastifiant sur le temps d'écoulement sont donnés dans le Tableau 3.3 et illustrés sur la Figure 3.3.

Tableau 3.3: Valeur de temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant

Superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Temps d'écoulement (sec)	10	8	4	3.75	4

Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de mortier passant à travers une ouverture étroite ; plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

La figure 3.3 montre que le temps d'écoulement du mortier à travers l'entonnoir en V (v-funnel) diminue avec l'augmentation du dosage en superplastifiant, jusqu'à un dosage de 1.8 %. OÙ à partir duquel le temps d'écoulement augmente légèrement. On appelle le point d'intersection des deux parties de la courbe point de saturation, c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation de dosage en

superplastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du mortier alors, il y a une saturation du système par le superplastifiant. On peut aussi observer que tous les dosages en superplastifiant permettent d'atteindre des valeurs de temps d'écoulement acceptables (entre 2 et 10 secs) [111]. Donc on peut conclure que le dosage optimal de superplastifiant est SP/L=1.8%, sans présence de ségrégation ni de ressuage.

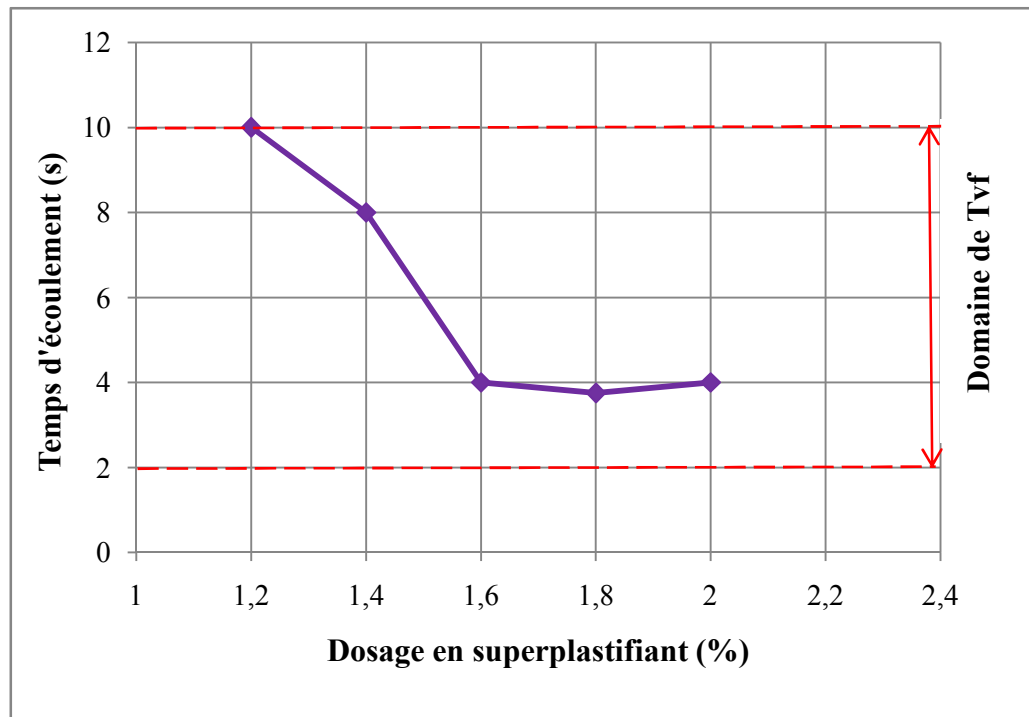


Figure 3.3: Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.

3.3 Effet du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

L'effet du laitier sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants à l'état frais est analysé à travers une série d'essais particuliers aux BAP, qui nous permettent d'étudier la variation de l'ouvrabilité en fonction du dosage du mélange en laitier. Notre formulation a été caractérisée par : S/M=0.5, SP=1.8% et E/L=0.40. La finesse du laitier a été maintenue constante à 3500 cm²/g. Trois compositions ont été élaborées en changeant le taux de substituant de laitier de 0, 15 et 25 %. Le tableau 3.4 représente les trois compositions des BAP testés avec un béton de référence le BAPR qui contient 0 % de laitier, nous rappelons que le laitier a été introduit par substitution du poids de ciment.

Tableau 3.4 : Composition des BAP testés.

Compositions	Unité	BAP R0 % L	BAP 15 % L	BAP 25 % L
Ciment	kg/m ³	505	431	381
Laitier	kg/m ³	0	72	120
Gravier (3/8)	kg/m ³	232	232	232
Gravier (8/15)	kg/m ³	463	463	463
Sable	kg/m ³	985	985	985
Eau	kg/m ³	202	201	200
Superplastifiant	kg/m ³	9.08	9.04	9.02

Les essais de caractérisation de ces bétons ont été effectués selon les guides européens du BAP [118], dont les valeurs limites sont données dans le Tableau 3.5. Les résultats des essais sur l'ouvrabilité des différents bétons autoplaçants sont donnés dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.5: Valeurs recommandées pour les essais du BAP [118].

	Essai	Unité	Valeurs limites
Essai d'Étalement	Étalement S	mm	550 – 850
	Temps d'Écoulement T₅₀	sec	2 - 5
Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement	sec	6 -12
Essai de ségrégation	Laitance passant à travers le Tamis	%	0 - 15
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H2/H1)	/	0,8 - 1
	T₂₀	sec	/
	T₄₀	sec	/

(/) Ne sont pas mentionnés.

Tableau 3.6: Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Essai		BAP R	BAP 1	BAP 2
		0 % L	15 % L	25 % L
Essai d'Étalement	Temps d'Écoulement T_{50} (sec)	2,65	2.46	2,34
	Étalement S (mm)	706	745	765
Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement (sec)	9,47	7,79	7.56
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Laitance passant à travers le Tamis (%)	4.72	6,21	8,66
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H2/H1)	0,63	0,81	0,87
	T_{20} (sec)	0.91	0.79	0.66
	T_{40} (sec)	2.3	1.9	1.32

3.3.1 Étalement et Temps T_{50} au cône d'Abrams

Le critère d'ouvrabilité pour un BAP est le critère d'écoulement non confiné représenté par l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Dans cette étude, la mesure de l'ouvrabilité des BAP a été mesurée conformément à la norme **EN 12350-8 [119]**. Les résultats obtenus de l'étalement et le temps d'écoulement T_{50} des BAP en fonction de la teneur en laitier sont représentés sur la Figure 3.4. En augmentant le pourcentage de laitier dans les mélanges de BAP, on constate un accroissement progressif de l'étalement de la galette du béton qui varie de 706 mm à 765 mm pour un taux de substitution de 0 % et 25 % respectivement, tout en restant dans la marge des valeurs correspondantes au BAP [121].

On remarque sur cette figure que le laitier améliore l'ouvrabilité du béton et on note que le pourcentage de 25 % de laitier donne la plus grande valeur d'étalement acceptable (765 mm) sans ségrégation ni ressuage. En plus, donne la plus faible valeur de T_{50} (2,34 s). Donc, on peut conclure que le taux de substitution de 25 % de ciment par le laitier

est considéré comme le dosage optimal qui permet de vérifier la capacité de remplissage à l'état libre en absence d'obstacles.

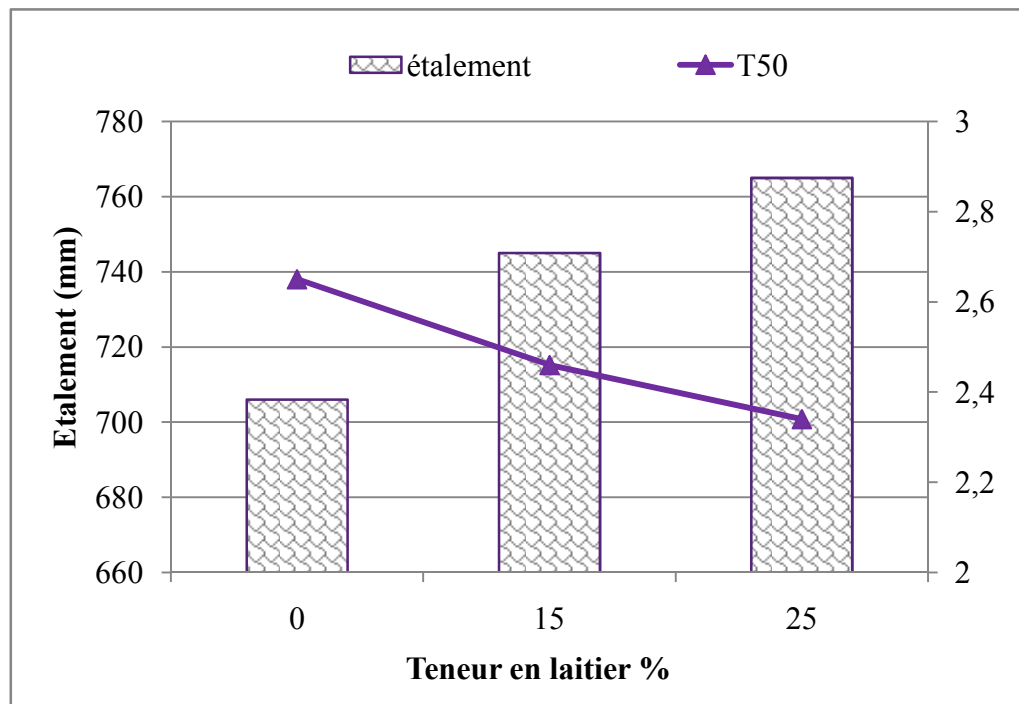


Figure 3.4: Étalement et temps d'écoulement T50 en fonction de la teneur en laitier.

D'après **Boukendakdji et al.[72]**, la substitution du ciment par le laitier d'un pourcentage de 0 à 25 % donne des valeurs d'étalement acceptable varient de 630 à 787 mm et un temps d'étalement T50 varie de 0,66 et 1,25 seconde. Une bonne fluidité avec l'augmentation de teneur en laitier jusqu'à 15 % a été observée, par la suite le temps d'écoulement T50 augmente, mais avec la présence du ressuage et de la ségrégation.

Behim et Boucetta [123] ont montré que la fluidité du béton augmente considérablement en fonction de l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 30 % de dosage; au-delà de cette valeur ils ont noté, une diminution de l'étalement en particulier pour le BAP avec 60 % de laitier comme substitution du ciment.

Selon Her-Yung et Chih-Chung [125], l'addition du laitier comme substituant de ciment améliore les propriétés à l'état frais. Les résultats montrent que l'étalement varie en fonction du taux de substitution de laitier de haut fourneau par le ciment Portland. Le dosage optimal est de 15 % de laitier.

Fang et al. [129] ont étudié l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés du béton autoplacant a hautes performances. Les auteurs ont trouvé que la substitution de 60 % de ciment par 30 % de laitier et 30 % de cendre volante a amélioré l'ouvrabilité du béton par rapport au béton de référence

Wood [130] rapporte que les grains du laitier se caractérisent par des surfaces vitreuses lisses à faible taux d'absorption ce qui permet un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte de ciment. De plus, le laitier de haut fourneau ayant une granulométrie différente de celle du ciment, cette granulométrie permet d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange, ce qui permet d'avoir une bonne meilleure fluidité du béton.

Aarre et Domone [119] ont proposé un étalement entre 650 et 700 mm, et un temps T50 d'écoulement de 2 à 4 s, correspondant aux mélanges contenant entre 10-15% de laitier. Le dosage optimal du laitier qui donne un bon BAP sans présence de ségrégation est de 15 %.

D'après **Mucteba Uysal et Kemalettin Yilmaz [126]**, les bétons qui contiennent des ajouts minéraux ont montré une meilleure performance que les bétons sans ajout en ce qui concerne la maniabilité. L'utilisation des additions minérales dans le BAP vise à accroître la distribution des particules de la matrice de la poudre, et par conséquent, de réduire les frottements entre particules. Une augmentation d'étalement a été observée jusqu'à 20 % de laitier avec un optimum de 15 %, mais plus la teneur en laitier augmente et plus la ségrégation et la viscosité augmentent aussi [127].

Selon **Li et Ding [124]**, l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30 % dans le mortier améliore son ouvrabilité.

Gesoglu et al. [122] ont aussi constaté que le laitier a une influence significative sur l'étalement. L'incorporation de laitier à raison de 20 et 40 % dans le béton améliore son ouvrabilité. Cependant, une diminution de l'étalement du béton est notée pour des pourcentages de laitier de 60 %. Cette réduction est due principalement aux particules du laitier qui sont considérées comme une addition à caractère pouzzolanique dont sa demande en eau est importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton pour certains dosages [123].

3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-funnel) en fonction de la teneur en laitier sont représentés sur la Figure 3.5, cet essai consiste aussi à évaluer la mobilité du béton à passer à travers les zones confinées par la mesure du temps d'écoulement à travers l'entonnoir T_{Vf} (en seconde).

On note que les valeurs de temps d'écoulement sont de l'ordre décroissant de 9,47 à 7,56 secs dépendant principalement du pourcentage de laitier. Le plus bas temps d'écoulement de 7,56 sec a été mesuré pour le BAP avec 25 % de laitier, tandis que le mélange avec 15 % de laitier avait un temps d'écoulement de 7,79 sec, et le BAP 0 % avait le temps d'écoulement égal à 9,47 sec, donc on conclue le temps d'écoulement T_{Vf} diminue légèrement avec l'augmentation du dosage de laitier.

Les valeurs vérifient les recommandations puisque $T_{Vf} < 10$ secondes [128].

Selon Park et al. [133], le temps d'écoulement $T_{V-funnel}$ présente également un comportement proportionnel à la teneur de l'addition minérale. Le dosage des cendres volantes jusqu'à 50 % de substitution diminue $T_{V-funnel}$. De nombreux chercheurs ont utilisé à la fois le T50 et à la fois $T_{V-funnel}$ comme indicateurs de la viscosité des bétons très fluides.

Mehmet et al. [134] ont observé que l'utilisation de ciment ternaire (ciment portland, fumée de silice et laitier) satisfait les recommandations **d'EFNARC [121]** en termes de temps d'écoulement de V-funnel. Le temps d'écoulement de V-Funnel optimum est obtenu pour 15 % de laitier.

Uysal et Sumer [132] ont étudié l'effet du calcaire, les cendres volantes, le laitier, la poudre de basalte et la poudre de marbre sur le temps d'écoulement au V-Funnel. Ils ont trouvé que toutes les formulations n'ont pas vérifié la marge du TV-F admissible. Par conséquent, un $T_{V-Funnel}$ supérieur à 15 sec serait très cohésif et difficile à manipuler.

Boukendakdji et al. [129] ont constaté que les valeurs du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) sont acceptables jusqu'à 20 % de laitier pour les mélanges de béton confectionnés avec les deux types de superplastifiant PC et PNS.

Mehmet et al. [130] ont rapporté que l'incorporation de filler calcaire a présenté un temps d'écoulement $T_{V\text{-funnel}}$ inférieur à celui des mélanges de la poudre de marbre. Ce résultat peut être attribué à la finesse des fillers. D'autre part, l'inclusion de cendres volantes a eu comme conséquence un temps d'écoulement relativement plus court.

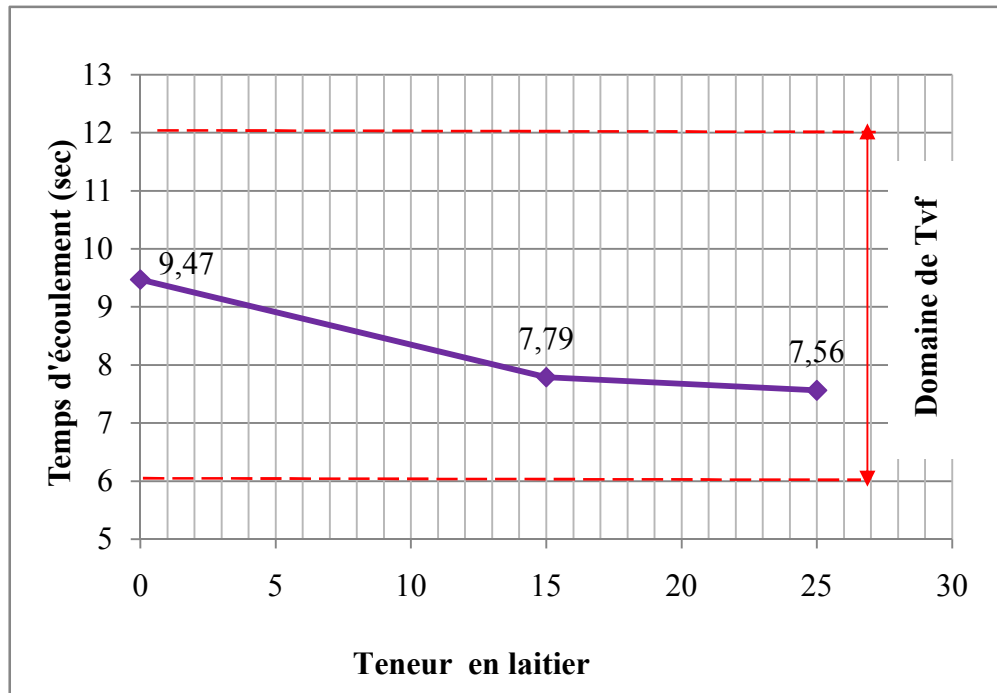


Figure 3.5: TV-Funnel en fonction de la teneur en laitier.

3.3.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai L-Box

L'essai de la boîte en « L » donne une bonne appréciation sur les trois capacités, celle du remplissage, du passage et de la résistance à la ségrégation. En plus, l'aspect rhéologique est exprimé par l'analyse des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de la même boîte. Les résultats du rapport H_2/H_1 , T_{20} et T_{40} obtenus en fonction du pourcentage du laitier sont présentés sur les figures 3.6 et 3.7.

La figure 3.6 montre que le rapport H_2/H_1 augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier, on remarque aussi que le rapport H_2/H_1 varie de 0.63 à 0.81 pour les BAPR et le BAP avec 15 % laitier. La raison de la faible valeur de H_2/H_1 est due au mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage qui cause des problèmes de blocage ou de ségrégation. Aussi plus le pourcentage de laitier augmente plus le rapport H_2/H_1 tend vers

1, mais avec une valeur optimale à 25 % de laitier. L'augmentation du taux de substitution de 15 % à 25 % augmente le rapport H_2/H_1 de 0,81 à 0,87.

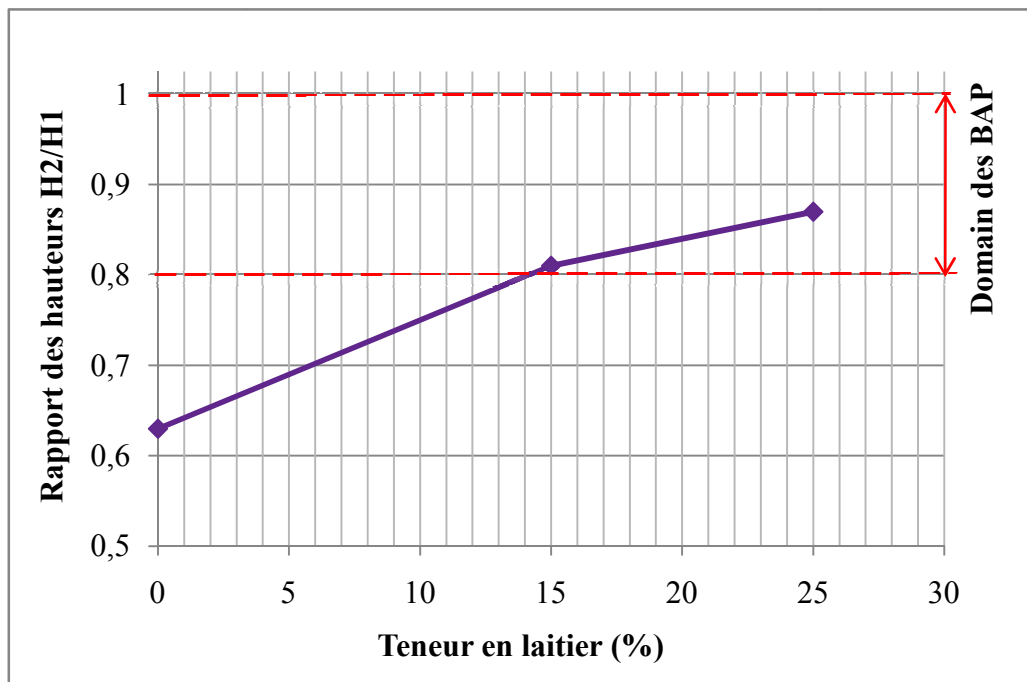


Figure 3.6: Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier.

Mucteba et Kemalettin [126] ont observé que l'augmentation du pourcentage des additions minérales tel que le calcaire, le marbre et le basalte dans le BAP, n'affecte pas le rapport de blocage. Cependant, on peut noter que chaque BAP étudié présente une capacité de remplissage et de passage suffisante.

Dinakar et al. [133] ont observé que le rapport H_2/H_1 de la boîte en « L » présente des valeurs supérieures à 0,8 pour les BAP à base de cendres volantes avec un taux de substitution de 30 à 70 % à l'exception du taux de 10 % en raison de son comportement thixotrope.

En générale l'utilisation des ajouts minéraux comme le fumé de silice, cendres volantes et le laitier améliorent d'une manière appréciable les propriétés d'ouvrabilité du BAP [130].

Mehmet et al. [134] ont conclu que l'incorporation des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier augmentent le rapport de L-Box (H_2/H_1), ce qui montre l'amélioration de la capacité de remplissage et de passage des BAP.

D'après **Rahmat et Mousavi [135]**, la substitution partielle du ciment par le metakaolin diminue la capacité de passage des BAP, mais d'autres chercheurs n'ont pas observé l'effet de blocage dans le test de la boîte L.

Miao Liu [136] a montré la possibilité de production d'un BAP avec un pourcentage de 80 % de cendres volantes. La substitution de cendres volantes conduit à une réduction de la conservation de la consistance et de la capacité de passage lorsque la capacité de remplissage est maintenue constante.

Mucteba et al. [137] ont fabriqué un BAP à base des additions minérales (fumée de silice, poudre de marbre, laitier de haut fourneau, calcaire, poudre de basalte), les meilleures performances d'ouvrabilité ont été obtenues avec l'addition de la fumée de silice.

Gesoglu et al. [122] ont observé clairement que tous les BAP fabriqués avec des mélanges ternaires et quaternaires à base des additions minérales tels que laitier, cendres volantes, fumée de silice ont eu les rapports H_2/H_1 de 0,82 à 0,93. Par contre, les mélanges binaires avec ou sans laitier présentent une faible cohésion et par conséquent, plus de risque de blocage que les autres mélanges.

Guneyisi et al. [138] ont démontré que le rapport H_2/H_1 est influencé par trois paramètres, le rapport E/L, la quantité et le type des additions minérales. L'augmentation du premier paramètre mène vers une diminution du rapport H_2/H_1 , mais l'augmentation du dosage en ajout mène vers une augmentation du rapport H_2/H_1 , mais cette variation dépend principalement du type de l'addition.

Behim et Boucetta [123] ont constaté qu'au-delà de 30 % de laitier une diminution des taux de remplissage due à l'augmentation de la viscosité du béton, ceci rend difficile l'écoulement et entraîne un blocage du béton.

La mobilité du BAP avec du laitier ou un mélange laitier-cendres volantes est beaucoup plus élevée que celle du BAP avec les cendres volantes uniquement. Ce dernier apparaît être très cohésif et donc plus lent que les autres mélanges [128].

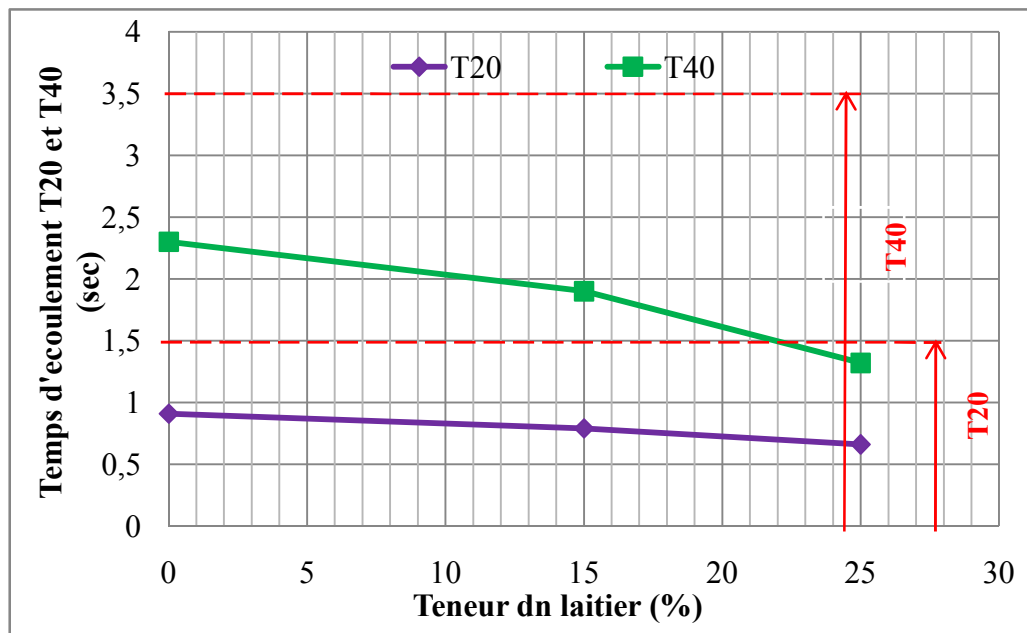


Figure 3.7: Temps d'écoulement T20 et T40 en fonction de la teneur en laitier.

D'après la figure 3.7, on remarque que les valeurs des deux temps d'écoulement T_{20} et T_{40} diminuent avec l'augmentation de la teneur en laitier, et on observe une tendance linéaire en fonction de la substitution du laitier par le ciment. Par conséquent, on peut conclure qu'un taux de substitution de 25 % de ciment par le laitier présente un dosage optimal. Le temps d'écoulement T_{20} et T_{40} sont vérifiés pour tous les BAP, où ils n'ont pas dépassé la limite inférieure (1.5 sec) et supérieure (3.5 secs) respectivement.

3.3.4 Résistance à la ségrégation par tamisage

L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité du BAP à rester homogène après la mise en place (absence de chute verticale des gros granulats) jusqu'au début de prise : c'est la résistance à la ségrégation statique.

D'après la Figure 3.8, on remarque que le pourcentage de la laitance augmente en fonction de l'augmentation de la teneur de laitier. Les valeurs du pourcentage de laitance trouvées présentent une stabilité satisfaisante. Selon les recommandations de l'EFNARC [121], une stabilité satisfaisante est obtenue si le pourcentage de la laitance est inférieur à 15 %.

Selon **Boukendakdji et al. [129]** les mélanges de béton avec 10 et 15 % de laitier, et pour les deux superplastifiants (PC, PNS), présentent une résistance optimale à la ségrégation, mais au-delà de 15 % de laitier, la présence de ressuage et de ségrégation est confirmée.

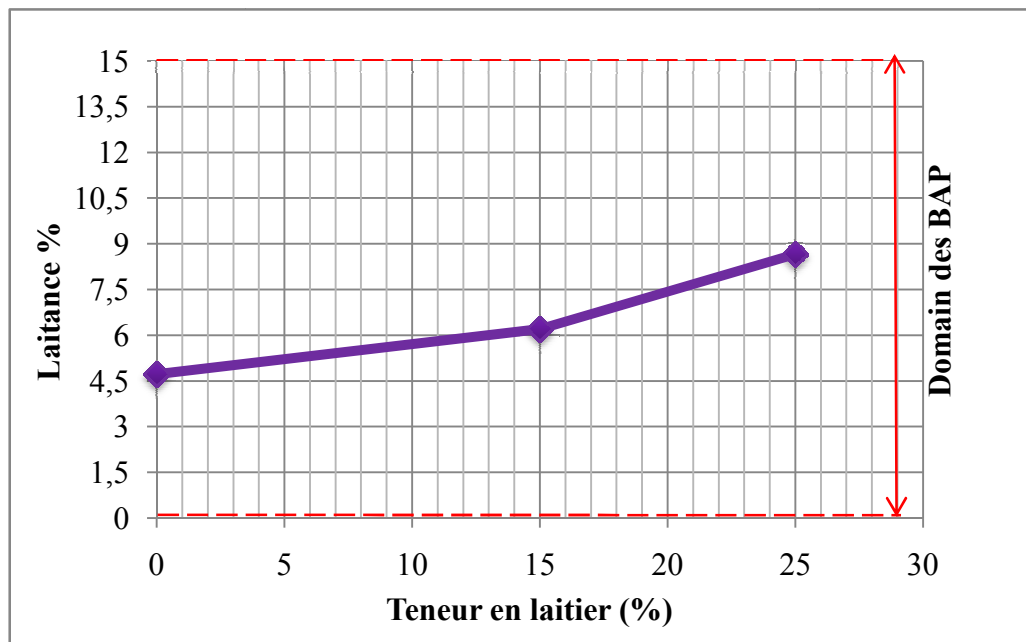


Figure 3.8: Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction de la teneur en laitier.

Mucteba [115] a montré que tous les mélanges à base des additions minérales ont une bonne viscosité et une résistance à la ségrégation. La ségrégation des tamis de 80 % de cendres volantes présente le plus faible pourcentage de laitance [100].

Liu [136] a constaté qu'il y'a une amélioration de la résistance des BAP à la ségrégation pour les formulations à base de 80 % et 100 % de cendre volante (CV). L'indice de ségrégation de ces deux formulations ont été seulement de 5 % et 7 %. Ceci est conforme avec les travaux de **Bouzoubaa et Lachemi [115]** qui ont constaté que l'indice de ségrégation des BAP à base de cendres volantes diminue avec l'augmentation de dosage de cendres volantes qui est accompagné par une augmentation du dosage du SP et une diminution du rapport E/L.

3.4 Effet de la cure sur le BAP à base du laitier à l'état durci

3.4.1 Essai d'ultrason

La figure 3.9 illustre les essais aux ultrasons et montre la relation entre les résistances à la compression par écrasement « R » et les vitesses ultrasoniques « V » correspondantes pour un BAP à 0, 15, et 25 % de laitier. Les essais ultrasoniques ont été effectués à 28 et 60 jours de durcissement, dont les durées de cures sont de 0, 3, 7 et 28 jours, les éprouvettes

sont ensuite conservées à l'air libre à l'intérieur du laboratoire. Les résultats de cet essai sont représentés dans le tableau 3.7

Tableau 3.7: Résultats des vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression par écrasement « RC » à 28 et 60 jours à base de laitier.

Âge (jours)	Durée de cure (jours)	BAP 0 % laitier		BAP 15 % laitier		BAP 25 % laitier	
		V (km/s)	Rc (MPa)	V (km/s)	Rc (MPa)	V (km/s)	Rc (MPa)
28	0	6.655	31.01	5.847	32.26	6.211	31.43
	3	7.042	32.21	6.144	33.13	6.578	34.09
	7	7.19	33.06	6.655	33.87	7.042	33.97
	28	7.407	34.93	7.605	35.41	7.874	36.94
60	0	5.882	32.99	6.051	33.34	7.246	34.63
	3	6.578	33.77	6.329	36.22	7.407	36.32
	7	6.677	36.33	6.389	37.47	7.532	38.94
	28	7.246	41.22	6.896	43.08	7.775	45.11

D'après les figures 3.9 et 3.10 on peut conclure qu'il existe une bonne corrélation entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses ultrasoniques correspondantes pour les BAP à 0, 15, et 25 % de laitier à différentes durées de cure à 28 et 60 jours de durcissement. On observe aussi une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la vitesse ultrasonique. À 28 jours les coefficients de corrélations sont 0.936, 0.984 et 0.887 avec respectivement un pourcentage en laitier de 0,15 et 25 %. À 60 jours les coefficients de corrélations sont 0.819, 0.996 et 0.999 avec respectivement un pourcentage en laitier de 0,15 et 25 %.

Dans le tableau ci-dessous (3.8), est présentée pour chaque type de BAP (0, 15, 25 % de laitier) à l'âge de 28 et 60 jours, l'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression simple (fonctions de forme exponentielle, puissance et polynomiale) :

Tableau 3.8 : différentes corrélations de BAP en fonction de la teneur en laitier à l'âge de 28 et 60 jours.

		Équation de corrélation	R ²	S
À 28 jours	BAP 0 % laitier	Rc=11.12 exp (0.152V) (1)	0.936	0.3167
	BAP 15 % laitier	Rc=24.11 exp (0.050 V) (2)	0.984	0.7708
	BAP 25 % laitier	Rc=18.68 exp (0.086V) (3)	0.887	0.7175
À 60 jours	BAP 0 % laitier	Rc=12.33 exp (0.162V) (4)	0.819	0.5595
	BAP 15 % laitier	Rc=0.971 V ^{1.964} (5)	0.996	0.3520
	BAP 25 % laitier	Rc=21.64V ² - 305.2V+1109 (6)	0.999	0.2231

R² : le Coefficient de corrélation.

S: l'écart type.

Rc en Mpa & V en km /s.

On trouve dans la littérature plusieurs modèles de corrélation entre la résistance à la compression par écrasement et la vitesse ultrasonique, **Benaïcha et al [139]** utilisant un béton autoplaçant à base des fibres métalliques et synthétiques ont adapté l'expression analytique de **P. Turgut [140]** avec comme équation de forme exponentielle (3.7) :

$$Rc=1.146 \exp (0.77 V) \dots\dots\dots (3.7)$$

Avec : Rc en MPa & V en km /s.

Khodja [141] a proposé à cette corrélation une relation de forme exponentielle présentée par l'équation 3.8 avec un coefficient de corrélation R² = 0,950 et une erreur type s = 5,417 MPa.

$$Rc = 0,008 \exp (1,839 V) \dots\dots\dots (3.8)$$

De même **Soshiroda et al. [142]**, ont développé, pour l'ultrason, une relation exponentielle (Eq. 3.9) d'un coefficient de corrélation R² = 0,900 et une erreur types s = 6,431 MPa.

$$R_c = 0,043 \exp(1,498 V^{28}) \dots \dots \dots (3.9)$$

Avec : R_c en MPa & V en km /s.

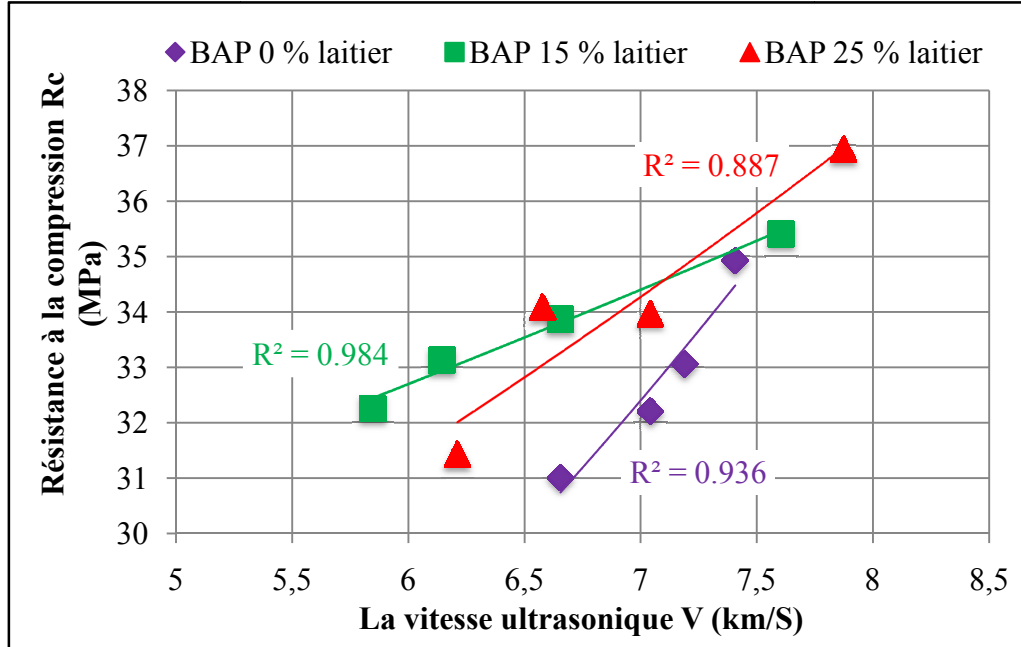


Figure 3.9: Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure à l'âge de 28 jours.

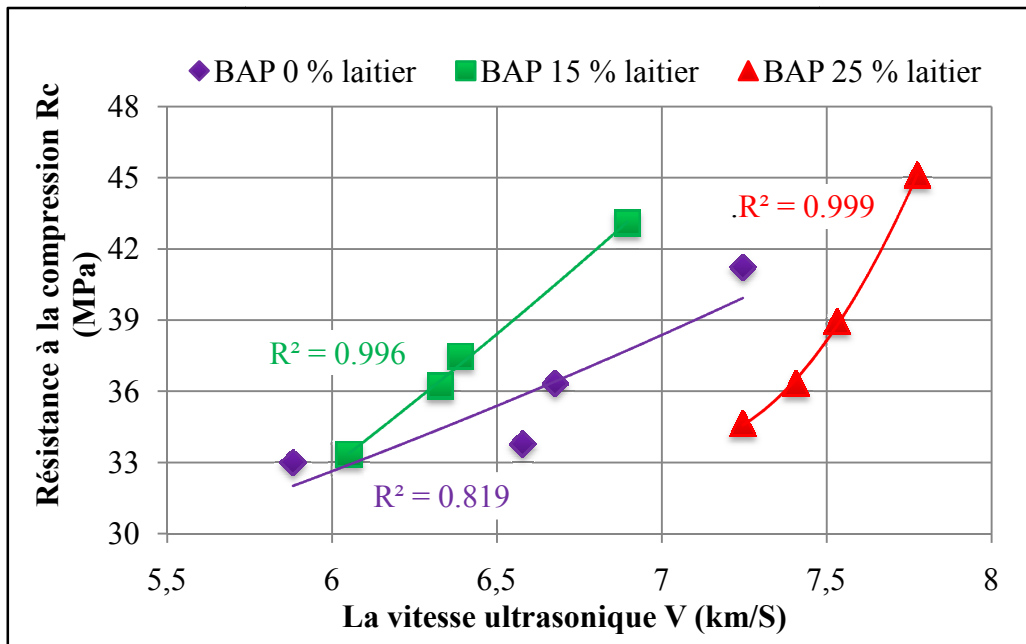


Figure 3.10 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure à l'âge de 60 jours.

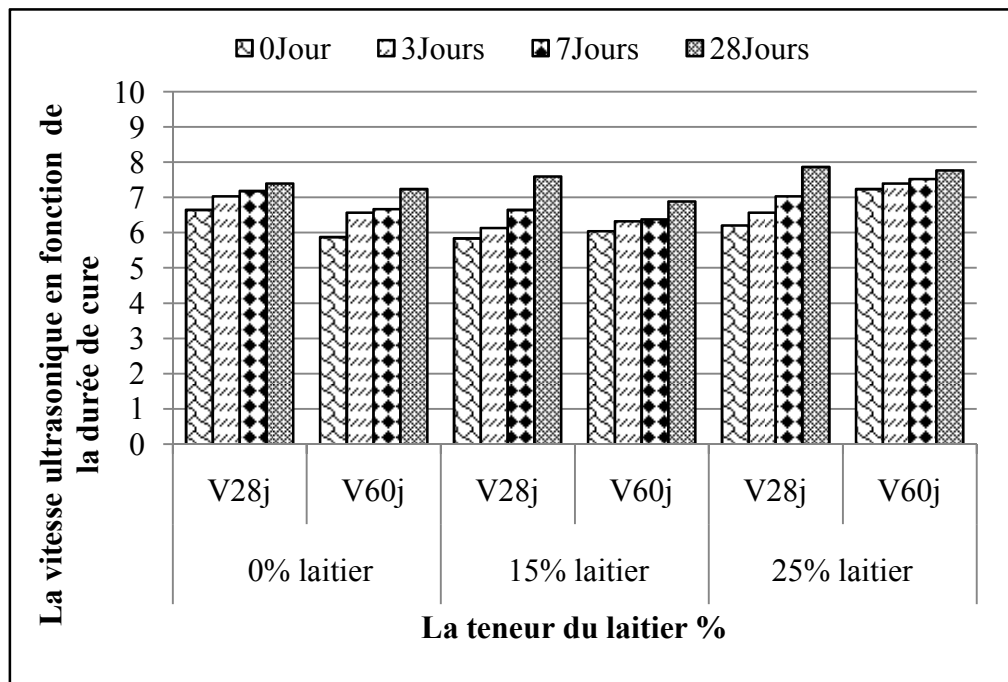


Figure 3.11: Effet de la durée de cure sur la vitesse ultrasonique à 28 et 60 jours des BAP à base de laitier.

La figure 3.11 montre que la vitesse ultrasonique augmente proportionnellement à l'augmentation du pourcentage en laitier, et cela à différentes durées de cure à l'âge de 28 et 60 jours de durcissement, On peut constater que la vitesse ultrasonique dépend fortement de la durée de cure.

On observe aussi que les bétons contenant 25% de laitier présentent une vitesse plus grande que celle du béton de référence (0 % de laitier) à l'âge de 28 et 60 jours de cure. Par ailleurs, et pour les bétons contenant 15% de laitier, on a observé une diminution de la vitesse par rapport au béton de référence (0 % de laitier).

3.4.2 Essai de scléromètre

La figure 3.12 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement « $R_{c_{28j}}$ » et les indices de rebondissement « I_r » pour un BAP à 0, 15, et 25 % de laitier. Les essais de scléromètre ont été effectués à 28 jours de durcissement, dont les durées de cures sont 0, 3, 7 et 28 jours, et sont ensuite conservés à l'air libre à intérieur de laboratoire.

Les résultats de cet essai sont représentés dans le tableau 3.9

Tableau 3.9: Résultats des indices de rebondissement, les résistances à la compression par écrasement « Rc28j » et les résistances correspondantes « Ri ».

Durée de cure (jours)	BAP 0 % laitier			BAP 15 % laitier			BAP 25 % laitier		
	I _r	R _{c28j} (Mpa)	R _i (Mpa)	I _r	R _{c28j} (Mpa)	R _i (Mpa)	I _r	R _{c28j} (Mpa)	R _i (Mpa)
0	25.36	31.01	14.12	23.04	32.26	11.64	30.96	31.43	20.74
3	25.00	32.21	13.80	25.29	33.13	14.06	33.35	34.09	24.56
7	28.50	33.06	17.96	27.38	33.87	16.65	33.32	33.97	24.78
28	31.54	34.93	21.92	32.71	35.41	23.44	34.39	36.94	25.99

Rc28j : la résistance à la compression par écrasement.

I_r : Indice de rebondissement médian sur l'éprouvette.

R_i : la résistance correspondante à l'indice de rebondissement.

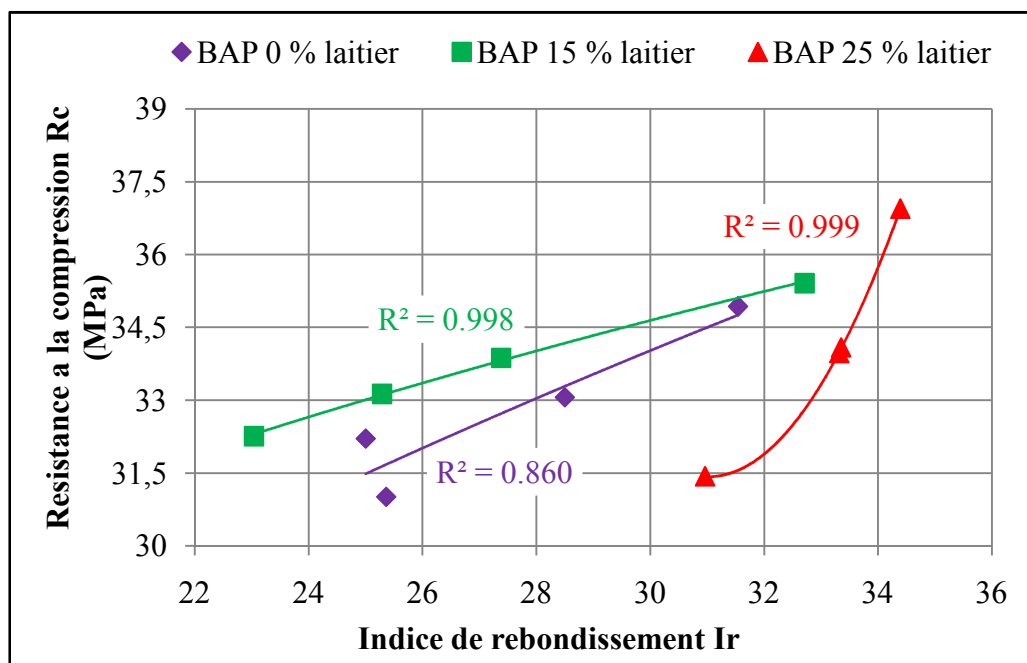


Figure 3.12 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.

D'après la figure 3.12, on peut conclure qu'il existe une bonne corrélation entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses ultrasoniques correspondantes pour les BAP à 0, 15, et 25 % de laitier à différentes durées de cure. On observe aussi une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'indice de rebondissement. Les coefficients de corrélations sont 0.860, 0.998 et 0.999 (respectivement pour un pourcentage de laitier 0,15 et 25 %). Donc on peut dire que les résultats trouvés par le scléromètre convergent vers ceux trouvés par écrasement direct.

Dans le tableau ci-dessous (3.10), est présentée pour chaque type de BAP (0, 15, 25 % de laitier), l'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression simple (fonction de forme puissance et polynomiale) :

Tableau 3.10: Différente corrélation de BAP en fonction de la teneur en laitier.

	Équation de corrélation	R ²	S
BAP 0 % laitier	$R_c = 8.013 I_r^{0.425} (10)$	0.860	3.06
BAP 15 % laitier	$R_c = 14.06 I_r^{0.264} (11)$	0.998	4.13
BAP 25 % laitier	$R_c = 0.485 I_r^2 - 30.10 I_r + 498.3 (12)$	0.999	1.45

Knaze et Beno [143] ont proposé une relation polynomiale (Eq. 3.13), d'un coefficient de corrélation $R^2 = 0,732$ et un coefficient de variation de 10,37 %. Cette corrélation développée sur des bétons ayant une variation biparamétrique (E/C et durée de serrage). Le rapport E/C varie de 0,37 à 0,53 et la durée de serrage varie de 0,5 à 3,0 min. Les différents types de bétons étudiés sont conservés dans des conditions standard.

$$R_c = - 0,002 I^2 + 2,045 I - 46,426 \dots\dots\dots (3.13)$$

Khodja [141] a déterminé une corrélation de forme puissance de l'équation 3.14 avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,960$ et une erreur type $s = 3,980$. Le béton faisant l'objet de cette corrélation est basé sur une variation triparamétrique (type de ciment, rapport E/C et l'âge). Les rapports E/C utilisés sont 0.4 et 0.6, les ciments utilisés sont de Sig et de Chlef. Les différents bétons examinés sont conservés dans l'eau à $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$.

$$R_c = 0,057 I^{1,817} \dots\dots\dots (3.14)$$

Avec : R_C en MPa.

Par contre, **Soshiroda et al. [142]** ont développé pour le scléromètre, une relation linéaire (Eq. 3.15) d'un coefficient de corrélation $R^2 = 0,965$ et une erreur type $s = 4,117$ MPa. Pour les bétons examinés, ils ont fait varier uniquement le rapport E/C dans une plage de 0,298 à 0,833, et les éprouvettes ont été conservées dans l'eau sous une température de 20 °C.

$$R_C = 1,623 I - 20,547 \dots \dots \dots (3.15)$$

Avec : R_C en MPa.

3.4.3 La résistance à la compression

Les résultats des essais : les valeurs de la résistance à la compression en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure humide (0, 3, 7 et 28 jours) sont reportées sur le tableau 3.11 et illustrées sur les figures 3.13 et 3.14.

Les figures 3.13 et 3.14 illustrent la variation de la résistance à la compression des BAP à base de laitier en fonction de la durée de cure humide ($T=20^\circ\text{C}$, $\text{RH}=100\%$). Les essais d'écrasement ont été effectués à 28 et 60 jours de durcissement dont les durées de cures sont 0, 3, 7 et 28 jours, conservés ensuite à l'air libre à l'intérieure du laboratoire de Blida pendant la période de printemps.

Tableau 3.11: Résistance à la compression à 28 et 60 jours des différents bétons étudiés.

Résistance à la compression (MPa)		Durée de Cure (jours)			
		0	3	7	28
BAP 0 % laitier	R_{C28j} (MPa)	31.01	32.21	33.06	34.93
	R_{C60j} (MPa)	32.99	33.77	36.33	41.22
BAP 15 % laitier	R_{C28j} (MPa)	32.26	33.13	33.87	35.41
	R_{C60j} (MPa)	33.34	36.22	37.47	43.08
BAP 25 % laitier	R_{C28j} (MPa)	31.43	34.09	33.97	36.94
	R_{C60j} (MPa)	34.63	36.32	38.94	45.11

D'après les figures 3.13 et 3.14 et à tous les âges de cure, on remarque une augmentation de la résistance à la compression à 28 et à 60 jours proportionnellement à l'augmentation de la quantité de laitier dans le béton, aussi, ces résistances dépendent fortement de la durée de cure.

Une des principales observations est que, plus la durée de cure dans l'eau est courte plus les résistances sont faibles et progressent moins dans le temps.

Nous avons remarqué un gain de 5 % en résistance lorsque la cure est de 28 jours par rapport à un échantillon de même âge qui n'a bénéficié aucune cure.

La cure est remarquablement efficace dès les premiers jours où on arrive à un gain de résistance de 2.05 MPa pour les 7 premiers jours seulement, cette efficacité diminue avec le temps ou le gain de 3.94 MPa est enregistré pour 28 jours de cure, durée peu envisageable pour la pratique : donc 3 à 7 jours de cure est un choix optimum.

On peut constater que l'augmentation de la substitution de laitier par le ciment de 15 à 25 % a conduit à une résistance à la compression à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quelle que soit la durée de cure. Ceci est dû à l'effet pouzzolanique du laitier qui se développe moins rapidement aux jeunes âges (Figure 3.12).

La résistance à la compression à 60 jours nous renseigne sur le niveau de résistance de béton à long terme et permet d'évaluer le gain de résistance après l'arrêt de cure humide. Les valeurs de la résistance à la compression à 90 jours varient entre 32.99 à 41.22, 33.34 à 43.08 et 34.63 à 45.11 Mpa pour les éprouvettes dont la teneur de laitier est respectivement de 0, 15 et 25 %.

La résistance à long terme (60 jours) augmente avec la durée de cure, mais cette augmentation est d'autant plus marquée que la substitution du laitier par le ciment est plus élevée. Ceci est dû à l'hydratation du laitier qui s'effectue à long terme lentement, mais régulièrement. Une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier a été observée à 60 jours. En effet, à 60 jours, cette augmentation est de 0.35 à 1.86% et 1.64 à 3.89% respectivement pour des taux de substitution de 15 % et 25 %. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres chercheurs qui ont travaillé sur le BAP à base d'ajouts minéraux.

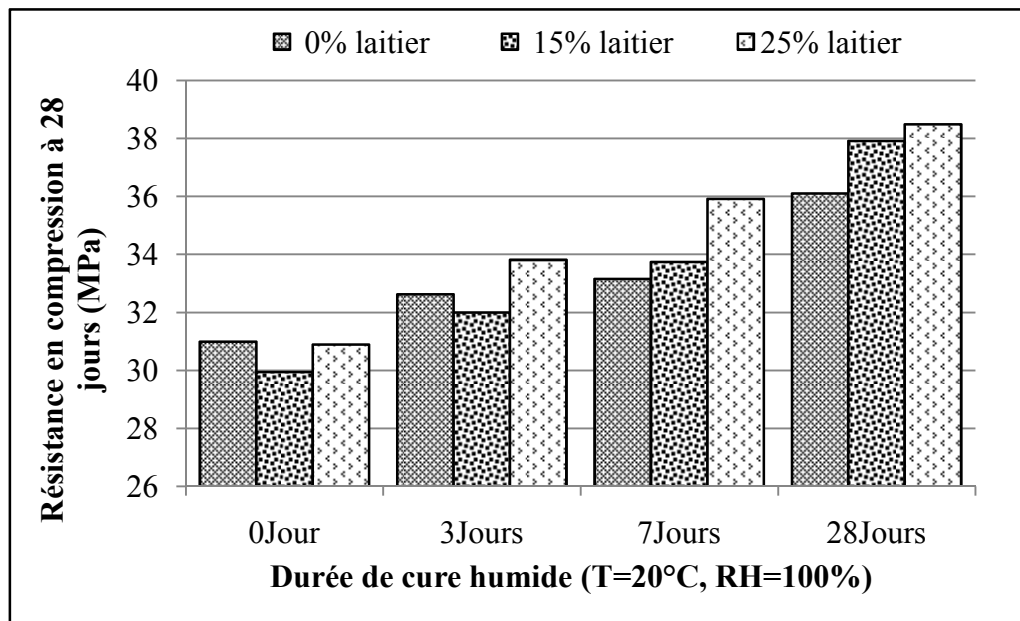


Figure 3.13: Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 28 jours des BAP à base de laitier.

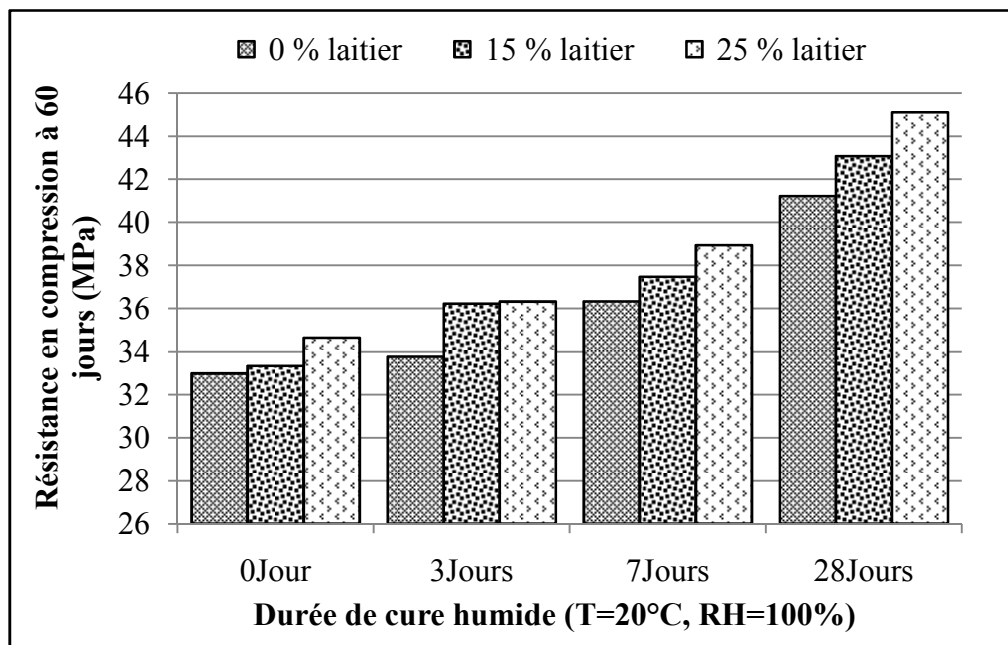


Figure 3.14: Effet de la durée de cure sur l'évolution de la résistance en compression à 60 jours des BAP à base de laitier.

Kenai et al [61], ont constatés que la durée d'une cure humide a un effet positif sur la résistance à la compression du béton à base de fines calcaires. Des échantillons de béton ont été conservés dans l'eau pendant 1, 3 ou 7 jours. Après, les éprouvettes sont conservées à l'air libre (toit du laboratoire) jusqu'aux échéanciers des essais.

De même Kenai et al. [144] ont montré que l'augmentation de la substitution de laitier par le ciment de 15 à 25 % a conduit à une résistance à la compression à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quelle que soit la durée de cure. Cela est dû à l'effet pouzzolanique du laitier qui se développe moins rapidement aux jeunes âges, et la résistance à 90 jours avec durée de cure 0, 3, 7 et 28 jours, l'augmentation est de 0.70 à 3.12 % et 3.19 à 6.82 % respectivement pour des taux de substitution de 15 % et 25 %.

Amrane et Kenai [145] ont rapporté que les résistances des bétons aux laitiers aux premiers âges sont faibles. Pour un béton à 40 % de laitier, elles représentent à 3 et à 7 jours 71 % et 78 % de la résistance du béton témoin. À 28 jours et plus, les résistances deviennent assez comparables sinon meilleures à celles du béton témoin. La résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais se développe assez bien à long terme pour des taux de substitution n'excédant pas les 30 %.

3.4.4. La perméabilité à l'eau

Les résultats de la perméabilité à l'eau des BAP sont représentés dans le tableau 3.12 et illustrés sur les figures 3.15 et 3.16.

Tableau 3.12: Les résultats de l'essai de la Perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure

	Cure	BAP 0 % laitier	BAP 15 % laitier	BAP 25 % laitier
La pénétration d'eau (mm)	0jour	30	26	19
	3jours	26	25.4	16
	7jours	25	23	13
	28jours	23	21	11.5
La pénétration d'eau en masse m (g)	0jour	34.5	32.50	14
	3jours	26.5	24.00	13.
	7jours	23.5	21.50	11.5
	28jours	21.5	19.50	8

$m (m_{\text{humide}} - m_{\text{sec}})$: Différence entre la masse humide après la mesure de la perméabilité à l'eau et la masse sèche avant la mesure.

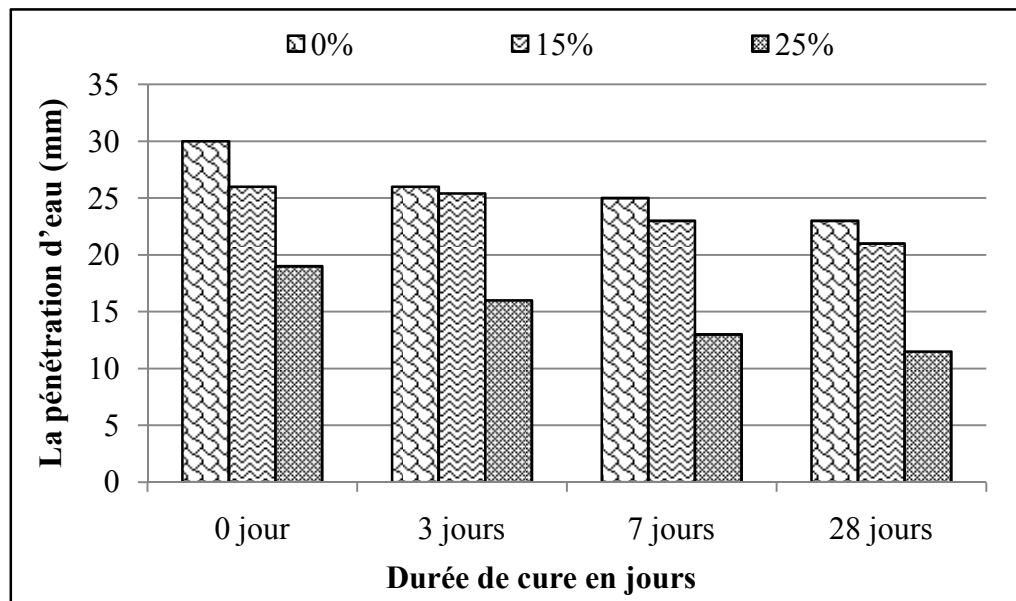


Figure 3.15: Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau des BAP à base de laitier.

On remarque que la profondeur de pénétration de l'eau des BAP diminue avec l'augmentation de l'âge de cure. La profondeur de pénétration de l'eau dépend fortement de la durée de cure. Plus la durée de cure humide est faible plus la pénétration d'eau dans le béton est grande.

On remarque aussi que les éprouvettes qui ont été conservées à l'air libre représentent une augmentation de 23.33% de perméabilité par rapport à celles conservées dans l'eau pendant 28 jours.

Une diminution de la profondeur de la perméabilité pour les BAP de 15 et 25% de laitier par rapport au BAP de référence est observée. On remarque que 25% de laitier présente la perméabilité la plus faible, ce qui confirme les résultats précédents. Ceci peut être expliqué par l'effet positif du laitier à long terme par sa lente hydratation qui se traduit par la diminution de la taille des pores de la structure, et réduit de ce fait la perméabilité des BAP au laitier. On peut conclure que la perméabilité à l'eau est étroitement liée aux dimensions des pores dans le mélange.

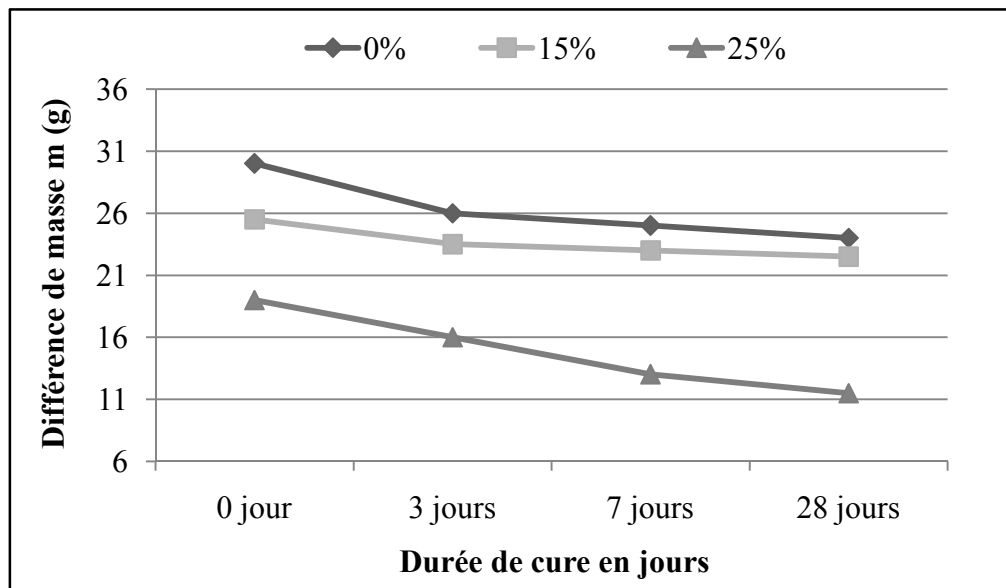


Figure 3.16: Effet de la durée de cure sur les différences masse avant et après la mesure de la perméabilité à l'eau des BAP à base de laitier.

D'après la figure 3.16 la Différence de masse avant et après l'essai de la perméabilité à l'eau diminue avec l'augmentation de l'âge de cure, cette différence diminue encore plus lorsque le taux de substitution de laitier augmente. On peut dire que la perméabilité à l'eau dépend fortement de la durée de cure et que le laitier fait diminuer la perméabilité.

Amrane et Kenai [145] ont observé que les perméabilités à 60 jours des bétons aux laitiers et du béton témoin sont très comparables. Le laitier algérien a une faible réactivité, mais il aura le temps de remplir les pores et réduit leur perméabilité.

Yahiaoui et al [146], ont trouvé que la profondeur de pénétration de l'eau diminue avec l'augmentation de l'âge de cure pour les BAP à 15 et 25 % de laitier par rapport au BAP de référence, ont observé aussi que 25 % de laitier présente la perméabilité la plus faible. Ceci peut être expliqué par l'effet positif du laitier à long terme par sa lente hydratation qui se traduit par la diminution de la taille des pores de la structure, et réduit de ce fait la perméabilité des BAP au laitier.

Al-Khaiat et Haque [104] ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau est beaucoup plus sensible à la mesure de cure initiale de SLWC (Structural light weight concrete). Alors que la résistance à la compression des éprouvettes exposées à des conditions ambiantes au bord de la mer était plus élevée que celles conservées dans l'eau.

Leur pénétration à l'eau a presque doublé lorsque la cure initiale était de 1 jour. Ces résultats indiquent l'importance de la cure initiale des structures côtières.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur le BAP avec une cure humide mène aux conclusions suivantes :

- Les essais de mini cône et V-funnel sur mortier nous ont permis de déterminer le dosage minimal d'E/L et le dosage optimal en superplastifiant.
- La substitution partielle du ciment par le laitier d'El-Hadjar a modifié certains paramètres à l'état frais et durci du BAP par rapport au BAP de référence, et l'incorporation de 25 % de laitier semble le dosage optimal.
- Le développement de la corrélation entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives correspondantes (indice de rebondissement et vitesse ultrasonique) est possible pour les BAP à 0, 15, 25 % de laitier à différentes durées de cure (0, 3, 7 et 28 Jours)
- les corrélations développées à l'aide du scléromètre et ultrason sur des BAP conservés dans des conditions humides ($T=20^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=100\%$) donnent des résistances supérieures à celles développées sur des bétons conservés à l'air libre à l'intérieur du laboratoire.
- L'augmentation de la substitution de 15 et 25 % du ciment par du laitier conduit à une résistance à 28 jours qui se rapproche de celle du béton sans ajout. Néanmoins, à 60 jours, une légère augmentation est observée.
- La perméabilité à l'eau diminue avec l'augmentation du taux de substitution du laitier à 60 jours.
- Enfin, l'effet de la cure humide et le pourcentage de la substitution du ciment par du laitier sur l'ensemble des propriétés physicomécaniques étudiées dans ce chapitre sont favorables à long terme.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet de la cure sur le béton autoplaçant à base de laitier

- ❖ Nous avons formulé un mortier autoplaçant en se basant sur la méthode d'Okamura pour optimiser le dosage optimal de superplastifiant puis nous avons reporté l'optimisation sur la composition du béton autoplaçant, au vu de ses résultats, le dosage nécessaire pour la formulation de BAP est 1.8 % ;
- ❖ L'augmentation du dosage de superplastifiant et la teneur en laitier a diminué la stabilité des BAP ;
- ❖ Le ciment a été partiellement remplacé par différents pourcentages de laitier ;
- ❖ L'ouvrabilité du BAP à l'état frais a été mesurée en utilisant les essais d'étalement, l'essai de V-funnel, la boîte en L et de l'essai de stabilité au tamis.
- ❖ L'incorporation du laitier de haut fourneau en tant qu'addition minérale dans les BAP influe d'une manière significative sur les propriétés du BAP à l'état durci à long terme. Le taux de substitution de 25 % du ciment par le laitier correspond au dosage optimal.
- ❖ La résistance à la compression maximale a été obtenue pour un taux de substitution de 25 % du ciment par du laitier : les meilleures valeurs de l'indice de rebondissement, la vitesse ultrasonique et la perméabilité à l'eau ont été obtenues à ce pourcentage.
- ❖ La durée de cure a un effet positif sur les essais destructifs et les essais non destructif. Aussi la perméabilité sur les échantillons conservés dans des conditions humides est moins importante sur les échantillons conservés à l'air libre.
- ❖ L'augmentation de la substitution du ciment de 15 et 25 % par le laitier conduit à une résistance à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quelle que soit la durée de cure.
- ❖ Les corrélations développées à l'aide du scléromètre et ultrason sur des spécimens conservés dans des conditions humides donnent des résistances supérieures à celles développées sur des spécimens conservés à l'air libre.

Recommandations

- ❖ Effet de la période de cure sur les retraits et le module d'élasticité des BAP.
- ❖ Impact de la cure sur le fluage des BAP
- ❖ Études de l'effet de la durée de cure la carbonatation des BAP.
- ❖ Choisir et appliquer différentes méthodes de cure sur le BAP.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ACI 116R-90., "Cement and Concrete Terminology", ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.2000.
- [2] Ollivier J.P., Vichot A., " La durabilité des bétons", Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008, 840 pages.
- [3] ACI 308-92., "Standard Practice for Curing Concrete," ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.1991.
- [4] Bombléd J.P., "La cure du béton. Publication CERILH n°280 de la revue : Ciment, Bétons, Plâtres, Chaux", N°746, (1984), pp.45-48.
- [5] Holcim Western Europe., "Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables", Guide pratique, Une publication de Holcim (Belgique) S.A. 1ère édition 2007.
- [6] Kosmatka., Steven H., Kerkhoff, Beatrix., Panarese, and William C; "Design and Control of Concrete Mixtures", EB001, 14th édition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.Ch;13.
- [7] Neville M., "propriétés des bétons", quatrième traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, Eyrolles, Paris. 2000.
- [8] Uno J.P., "Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas", ACI Materials Journal, Vol. 95, pp.365-375.
- [9] Chanvillard G., "Matériau béton-Connaissances générales". Ed. Presses de l'ENTPE.1999.
- [10] El Amiri A., Durability of concrete in hot Climate, PhD thesis, Leeds University, England, 1988.
- [11] Association Béton Québec, "La cure. Bulletin technique Techno-Béton", n°8, 2005, pp.1-5
- [12] ACI 308R, "Guide to Curing Concrete. 2001, 31p.

- [13] Mc carter W.J., & Ben-Saleh A. M., "Influence of practical curing methods on evaporation of water from freshly placed concrete in hot climate. Building and Environment", 2001, Vol. 36, pp. 919-924.
- [14] Peter C, Taylor, "curing concrete", CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, Boca Raton London New York, 2014.
- [15] Taylor, P. C., Johansen, V. C., Graf, L. A., Kozikowski, R. L., Zemajtis, J. Z., and Ferraris C. F., "Identifying Incompatible Combinations of Concrete Materials, Volume I-Final Report," Report HRT-06-079, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 2006,
- [16] Poole, T. S., "Curing Portland Cement Concrete Pavements, Volume II," FHWA-HRT-05-038, Federal Highway Administration, McLean, VA. 2006.
- [17] Holt, E. E., "Where Did These Cracks Come From?" Concrete International, 2000, vol. 22, no. 9, pp. 57-60.
- [18] ADAM N., «Chloride attack of reinforced concrete: an overview»; Materials and Structures, 1995, Vol. 28, pp. 63-70.
- [19] Norme NF EN I 97-1, «Centre d'information sur le ciment et ses applications ; «La normalisation française des ciments», 2001.
- [20] National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), "What, Why & How? Plastic Shrinkage Cracking," CIP 5, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD, 1992.
- [21] Chatterji, S., "Probable Mechanisms of Crack Formation at Early Ages of Concretes," International Conference on Concrete at Early Ages, RILEM, 1982, pp. 35-38,
- [22] Taylor H.F.W.; Cement chemistry; Thomas Telford edition; Reprinted 2003, 2004.
- [23] Bigas J.P., «La diffusion des ions chlores dans les mortiers »; Thèse de doctorat ;Génie civil ; INSA de Toulouse, 1994.

- [24] Rostásy, F. S., Tanabe, T., and Laube, M., “Assessment of External Restraint,” in Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, RILEM Report 15, R. Springens chmid, ed., E. & F.N. Spon, London, 1998, pp. 149–177.
- [25] American Concrete Institute (ACI) Committee 224, “Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures,” ACI 224.1R-93, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1993.
- [26] Nabil, B., Aissa, A., and Aguida, B., “Use of a New Approach (Design of Experiments Method) to Study Different Procedures to Avoid Plastic Shrinkage Cracking of Concrete in Hot Climates,” Journal of Advanced Concrete Technology, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 149–157.
- [27] Detwiler, R. J., and Taylor, P. C., “Specifier’s Guide to Durable Concrete,” PCA EB 221, Portland Cement Association, Skokie, IL. 2005.
- [28] Taylor, P.C. et al., “Development of Performance Properties of Ternary Mixtures: Field Demonstrations and Project Summary,” DTFH61-06-H-00011 Work Plans 12 and 19, Federal Highway Administration, 2012.
- [29] Stéphan A., «Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat d’INSA de Toulouse, 2004.
- [30] Baroghel B., «Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, analyses et résultats»; Thèse de Doctorat, LCPC, Paris, France, 1994.
- [31] Ballim, Y. et al., “Assessment and Control of Concrete Durability,” Concrete Meets the Challenge, National Convention of the CSSA, September, 1994.
- [32] Gagné R., GCI 714 - Durabilité et réparations du béton, Université de Sherbrooke - Centre de Longueuil, Québec, 338 p, 2000.
- [33] Ho D.W.S, Lewis R.K., « the water sorptivity of concretes: the influence of constituents under continuous curing», Durability of building materials, 4,1987, pp241-252.

- [34] Abbas A., Carcasses M., Ollivier J.P., "The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete", Magazine of concrete Research 52, 2000, 1-6.
- [35] Dhir, R. K.; Hewlett, P. C. et Chan, Y. N. Near Surface Characteristics of Concrete: Intrinsic Permeability. Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No 147, 1989, pp. 87-97.
- [36] Torrent, R. J., Jornet, A., "The Quality of the 'Covercrete' of Low-, Medium- and High-Strength Concretes. Proceeding of the Second International Conference on Durability of Concrete", ACI SP-126, Montreal, 1991, V.M. Malhotra Editor, pp. 1147-1161
- [37] Whiting, D., "Permeability of Selected Concretes. Permeability of Concrete", ACI SP-108, Detroit, p. 195-224.
- [38] Boucetta Tahar-ali., "Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçant et de hautes performances " thèses de doctorat 3eme cycle 2014.
- [39] Jaafar Walid., "la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons des géomatériaux", rapport de stage, ingénieur de recherche LCPC page 28-29DE.
- [40] Ben Fraj A., 'Transfert dans les bétons non saturés: influence des laitiers et de l'endommagement mécanique', Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2009.
- [41] H. Yigiter, H., YazICI, and S. AydIm., "Effetcts of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete", Building and environment, , 2007. 42(4), 1770-1776.
- [42] Gagné et Aïtcin., "Superplasticizers for durable concrete", Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre, Mexique, 1993.

- [43] Basheer L., Kropp J., Cleland D.J., Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, vol 15, pp 93-103, 2001.
- [44] Bessa-Badreddine, A., "Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers", Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, 2004.
- [45] Hocine S., « influence de type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de INSA de Rennes, 2010.
- [46] Mouret M., Bascoul A. ,et escadeillas G., « Drops in concrete strength in summer related to the aggregate temperature », *cement and concrete research* ,vol.27,n°3,pp 345-357.
- [47] Soroka I., « concrete In hot environnements», E& FN Spon, 1993,pp249.
- [48] Alsayed, S. H., "Effect of Curing Conditions on Strength, Porosity, Absorptivity, and Shrinkage of Concrete in Hot and Dry Climate," *Cement and Concrete Research*, 1994, vol. 24, no. 7, pp. 1390–1398.
- [49] Bushlaibi, A. H., "Effects of Environment and Curing Methods on the Compressive Strength of Silica Fume High-Strength Concrete," *Advances in Cement Research*, 2004, vol. 16, no. 1, pp. 17–22.
- [50] Galle C., «Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven, vacuum, and freeze-drying», *Cement and Concrete Research*, 2001, Vol. 31, pp. 1467-1477,
- [51] Meyer A., "The Importance of Surface Layer for the Durability of Concrete Structures," *ACI Special Publication 100*, John M. Scanlon, ed., 1987, vol. 2, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 49–61.
- [52] Soroka, I., and Baum, H., "Influence of Specimen Size on Effect of Curing Regime on Concrete Compressive Strength," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1994, vol. 6, no. 1, pp. 16–22.

- [53] Kosmatka, S. H., and Wilson, M. L., "Design and Control of Concrete Mixtures", 15th ed., Portland Cement Association, Skokie, IL, 2011, With permission.
- [54] Ramezani pour A. A. et Malhotra V. M., «Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume», *Cement & Concrete Composites* 17 ,1995, pp125-133.
- [55] Samir N., Shoukry., Gergis W. William. , Brian Downie. ,and Mourad Y. Riad , « Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete », *Construction and Building Materials* 25 , 2011, pp 688–696 .
- [56] Bakir N., Issaad A. et Beddar M., «Influence du climat chaud et de la cure sur les propriétés du mortier», 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), 2009.
- [57] Cebeci, Omar Z., « Strength of concrete in warm and dry environment », 1987, 20, 270-272.
- [58] Samir H. Al-Ani, Mokdad A. K. Al-Zaiwary, «The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather», 1988, 21,pp 205-212.
- [59] Balendran R.V., Martin-Buades W.H., «The influence of high temperature curing on the compressive, tensile and flexural strength of pulverized fuel ash concrete», 2000,pp 415-423.
- [60] Lachmat L. et Kenai S., « effet du type et de la durée de cure sur les propriétés du béton en climat chaud », *Proceeding du Séminaire international sur la Qualité du béton en climat chaud*, Ghardaïa, 1994, pp30-44.
- [61] Kenai S., Menadi B., "Use of sand from residues of aggregates quarries in concrete". Beijing, China, September 2005.
- [62] Nassif, H., and Suksawang, N., 2002, "Effect of Curing Methods on Durability of High-Performance Concrete," *Transportation Research Record* 1798-31, Paper No. 02-3305.

- [63] Bentur, A., and Goldman, A., "Curing Effects, Strength and Physical Properties of High Strength Silica Fume Concretes," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1989, vol. 1, no. 1, pp. 46–58.
- [64] Elkington, J. "Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development," *California Management Review*, 1994. vol. 36, no. 2, pp. 90–101.
- [65] Turcry P., « Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants Influence de la formulation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2004, 213 pages.
- [66] Fares H., « Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy Pontoise, 2009, 206 pages.
- [67] Petersson O. and Billberg P. Van B. K., «A model for self-compacting concrete», In *Proceedings of International RILEM Conference on production and workability of concrete*. RILEM, 1999
- [68] OH S.G., Noguchi T., and Tomosawa F., «Towards mix design for rheology of self compacting concrete», *First Int .Symposium on SCC* , Stockholm, Edited by Sharendahl and Petersson , RILEM publications PRO7, 1999, Cachan pp.361-372,
- [69] *Fiches Techniques, Tome2, « les Bétons: Formulation, Fabrication et mise en œuvre »*, centre d'information sur le ciment et ses applications, pp 108-119.
- [70] Rilem, "self compacting concrete", state-of-the-art report of rilem technical commite 174-SCC Self compacting concrete edited by A° ,skarendhal and O. Petersson, RILEM Publications S.A.R.L.
- [71] Bethmont S., « Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants. Etude expérimentale des interactions granulaire », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2005, 166 pages.
- [72] Boukendakdji O., « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant. Optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat de l'Université Saad Dahled Blida, 2010, 199 pages.

- [73] Borsoi A., Collepardi M., Collepardi S., Troli R. and Zanardi L. "Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes" 9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology, Warsaw, Poland, 2007, pp. 399-409.
- [74] Turkmen. A and Kantarc. A, «Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete», .Indian Journal of Engineering & Materials, , 2006, Vol13, pp247-252.
- [75] Ghafoori N., and Diawara H., « Influence of temperature on fresh performance of self consolidating concrete», 2010, pp946–955.
- [76] Maher EL BARRAK., « Contribution a l'étude de l'aptitude l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2005.
- [77] Balayssac J-P., Detriche Ch.-H. & Diafat N. "Influence de la durée de cure humide sur les caractéristiques mécaniques de bétons d'usage courant". Materials and Structures, 1997, Vol.30, pp.284-292.
- [78] El-Died A.S. " Self-curing concrete: Water retention, hydration, and moisture transport, Construction and Building Materials revue, 2007, Vol.21, pp.1282-1287.
- [79] Ghafoori. N et Diawara.H, « Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete», 2010, pp946–955.
- [80] Kamen Aicha., "comportement au jeune âge et différé d'un bfup écrouissant sous les effets thermomécaniques", thèse de magistère; Université de science et technologie de Oran, Algérie et de nationalité algérienne
- [81] Mounouga P., "Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques", Thèse de doctorat, Nantes, France, 2004.
- [82] Heba A. M., « Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions», 2011, 2, pp 79–86.

- [83] Hui Zhao., Wei Sun., Xiaoming Wu., and Bo Gao., « Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete », 2012, pp194–200.
- [84] Turk. K., Caliskan S., and Yazicioglu. S, « Capillary water absorption of self compacting concrete under different curing conditions», 2007, pp 365-372.
- [85] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. « A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 615–622.
- [86] Audenaert K. and De Schutter G., « Water permeability of self compacting concrete », Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Ghent University, Belgium, 9 pages
- [87] Perraton D., Aitcin P.C. et Carles-Gibergues A., « Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons: Perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », Bulletin de Laboratoires des Ponts et Des Chaussées, 1999, Vol 221, pp. 69-78.
- [88] Benouis A., Khaldi N., et Cherait Y., “Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition“, Afrique Science 03, Vol.3, 2007, pp.305-314.
- [89] GovindKhare R., "Prediction of compressive strength of concrete by various non destructive tests methods", Essar Engineering Center, Mumbai, 15p.
- [90] Evangelista A. C., Shehata I., Shehata L., "Parameters that influence the results of non-destructive test methods for concrete strength", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2003, 7p.
- [91] Celaya M., Nazarian S., Yuan D., "Comparison of field and laboratory strengths of concrete slabs", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, France, 2009, 6p.
- [92] Bin Ibrahim A. N., Bin Ismail P., Forde M., "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures", International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002, 242p.

- [93] Lorenzi A., Caetano L. F., Campagnolo J. L., Silva Filho L. C., "An investigation of the suitability of different NDT test methods to detected voids of concrete elements ", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, France, 2009, 8p.
- [94] Balayssac J.P., Laurens S., Arliguie G., Ploix M.A., Breysse D., Dérobert X., PIwakowski B., "Evaluation of concrete structures by combining non-destructive testing methods (SENSO project) ", Non-Destructive Testing in Civil Engineering, France, 2009, 8p.
- [95] NF EN 12504-4, "Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son", AFNOR, 2005, 17p.
- [96] Sakhraoui S., Mouffok L., "Application de la méthode ultrasonique pour le calcul prévisionnel des résistances des bétons après traitement thermique", Technologie du Béton, Séminaire, Alger, 2009, 10p.
- [97] Venuat M., «La pratique des ciments et des bétons », Edition du Moniteur des travaux publics et du bâtiment, Paris, France. 1976.
- [98] Benkaddour M., Zaki Aoual F. & Semcha A., « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle », Revue Nature et Technologie, 2009, N° 01, pp 63-73.
- [99] R. F. Feidman, "Essais non destructifs du béton", CBD-187-F, 2005, 6p.
- [100] Bilim C., Karahan O., Atis C.D and Ilkentapar S., «Influence of admixtures on the properties of alkali activated slag mortars subjected to different curing conditions», Materials and Design 44 ,2013, 540–547.
- [101] Naik T. R., Malhotra V. M., Popovics J. S., "The Ultrasonic Pulse Velocity Method", Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press LLC, 2004, 19p.
- [102] Bungey H., Millard S.G., "Testing of concrete in structures", Chapman & Hall, 1996, 292p.
- [103] ASTM C597-02, "Standard test method for pulse velocity through concrete ", ASTM International, 2003, 4p.

- [104] Al-Khaiat H. and Haque M.N., « Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete», *Cement and Concrete Research*, 1998, Vol. 28, No. 6, pp. 859–866,
- [105] Martin J. and Hans W. R., « Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature», 2002, 1497–1504.
- [106] Berhane.Z, « The behaviour of concrete in hot climates», *Materials and Structures*, 1992, 25, pp 157 162.
- [107] Bejaoui S.; « Etude du comportement des bétons soumis à des sollicitations climatiques de type gel/dégel », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 2000.
- [108] FELDMAN R.F., «Significance of porosity measurement on blended cement performance»; 1er Inter. Conf. on user of fly ash, silica fume, slag and other mineral byproducts in concrete, Montebello, V.M. Malhotra Ed. , 1983 ; ACI, SP 79, Vol. 1, pp. 415-433.
- [109] Naceri A., et Messaoudene I. , ‘Effet de l’activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier’, *Lebanese Science Journal*, 2006, Vol.7, N°.2, pp.85-96.
- [110] Flatt R.J. « Polymeric dispersants in concrete. In *Polymers in particulate systems - Properties and applications* » Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages
- [111] Diederich.P, « Contribution à l’étude de l’influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplçant du béton », Thèse de Doctorat à l'Université Toulouse III - Paul Sabatier ; 2010.
- [112] Domone P.L.J. and Jin J., « Properties of mortar for self compacting concrete », *Proceedings of International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 07)*, 1999, pp. 109-120.
- [113] AFGC « Recommandations pour l’emploi des bétons autoplçants», document scientifique et technique, 2008.
- [114] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, specification, production and use/BIBM, CEMUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO//May 2005. [www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelines May2005.pdf](http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelines%20May2005.pdf)

- [115] Bouzoubaa N., and Lachemi M., "Self – Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results", *Cement and Concrete Research*, vol.31, 2001, pp. 413 – 420.
- [116] NF EN 12504-2, “ Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement“, AFNOR, 2003, 9p.
- [117] Norme française, P 18-406., «Béton-essai de compression», AFNOR, Paris, 1981.
- [118] ASTM C1585 – 11, «Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes», 2012.
- [119] Aarre T., Domone P., «Reference concretes for evaluation of test methods for SCC», In: *Proceedings of 3rd RILEM international symposium on self compacting concrete*, Reykjavik, Iceland; 2003. p. 495–505.
- [120] EN 12350-8., " self-compacting concrete – slump-flow test"; *Testing fresh concrete – part 8*, 2007.
- [121] EFNARC., «Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete», , 2002.
- [122] Gesoglu M., Guneyisi E., Ozbay E., ‘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*, 2009, vol. 23, pp. 1847-1854
- [123] Behim M., Ali Boucette T., ‘Effet des additions micronisées sur l’écoulement des Bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre’, *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran (Algeria), 2009, pp. 423- 430.
- [124] Li Z. Ding Z. «Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag», *Cement and Concrete Research*, 2003, vol 33, pp. 579-584.
- [125] Her-Yung Wang., and Chih-Chung Lin., « A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC) », *Construction and Building Materials* 42, 2013, p132–136.

- [126] Uysal. M, and Yilmaz, K « Effect of mineral admixtures on properties of self compacting concrete», *Cement & Concrete Composites* 33, 2011, p771–776.
- [127] Boukendakdji, O., Kadri.E.H. and Kenai,S.« Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self compacting concrete», *Cement & Concrete Composites* 34 ,2012, p583–590.
- [128] Domone P.L., Chai H.W. and Jin J. «Optimum mix proportioning of self-compacting concrete», *Proceeding on international conference on ‘innovation in concrete structures: design and construction*, University of Dundee, Ed. Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, 1999, pp. 277-285.
- [129] Boukendakdji O., Kenai S., E.H. Kadri , Rouis F., « Effect of slag on the rheology offresh self-compacted concrete», *Construction and Building Materials*, vol. 23 ,2009 ,2593–2598.
- [130] Uysal M., Sumer M., ‘Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures’, *Construction and Building Materials*, vol 25, 2011, N° 11, pp. 4112-4120.
- [131] Fang W., Jianxiong C., Changhui Y ., "studies on self-compacting concrete high performances concrete with high volume mineral additive", *proceedings of the frist International RILEM symposium on self compacting concrete*, 1999, pp569-578, sweden.
- [132] Saric-Coric M., P.Aitcin, "Béton à haute performance a base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice", *Canadien Journal of civil Engineering* 30, 2003, pp.414-428.
- [133] Dinakar P., Kartik Reddy M., Mudit Sharma., « Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash», *Materials and Design* 46, 2013, p609–616.
- [134] Mehmet Gesoglu., Erhan Guneyisi., Erdogan Ozbayb., « 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 ,2009, p 1847–1854.

- [135] Rahmat Madandoust, S. Yasin Mousavi., «Fresh and hardened properties of selfcompacting concrete containing metakaolin», *Construction and Building Materials* 35, 2012, p 752–760.
- [136] Miao Liu., « Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash», *Construction and Building Materials* 24. 2010, p1245–1252.
- [137] Mucteba Uysal., Kemalettin Yilmaz., MetinIpek., «The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete», *Construction and Building Materials* 27 ,2012, p263–270.
- [138] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., ‘Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures’, *Construction and Building Materials*. 2010. vol. 24, pp. 1878-1887.
- [139] Benaicha M., Jalbaud O., Alaoui Hafidi A., Burtschell Y., « Sonic Auscultation and Mechanical Characterization of Metallic Synthetic Fiber-Reinforced Self Compacting Concrete», Département Génie Civil, laboratoire IUSTI, Polytech’ Marseille – France 2 Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, FST de Tanger – Maroc, 2013, Vol 3 No.1
- [140] Turgut P., Evaluation of the Ultrasonic Pulse Velocity Data Coming on the Field, 4th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, London, 2004.
- [141] Khodja A. B., « Corrélation entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance », Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie. 2010.
- [142] Soshiroda T., Voraputhaporn K. & Nozaki Y., « Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined non-destructive method », *Materials and Structures* J., 2006, Vol.39, pp.149-160.

- [143] Knaze P., & Beno P., « The use of combined non-destructive testing methods to determine the compressive strength of concrete », *Matériaux et constructions journal*, 1984, Vol.17, N° 99, pp.207-210.
- [144] Kenai S., Yahiaoui W., Menadi B., Khatib J., «Effect of Hot Climate on the Performance of SCC Containing Slag », *International civil engineering & architecture symposium for academicians 2014*, 17-20 May 2014, Antalya, Turkey.
- [145] Amrane A., et Kenai S., « Propriétés mécaniques et Durabilité du béton au laitier en climat chaud », *Proceeding du Séminaire international sur la Qualité du béton en climat chaud*, Ghardaïa, 1994, pp106-122.
- [146] Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B., « Effet de la cure sur la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire des BAP a base de laitier», *Séminaire International Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction*, N°3, Alger, 17 et 18 Nov, 2014.
- [147] Hadj Sadok A., Kenai S., et Courard L., « Perméabilité au gaz et aux ions chlore des mortiers à base de laitier de faible hydraulicité », *INVACO2, Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction* N° : 10-189.

ANNEXE A

Annexe A : Fiche technique « MEDAFLOW 30 »

A.1 Description

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

A.2 Domaines d'application

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçants
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

A. 3 Les propriétés

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet : Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton.

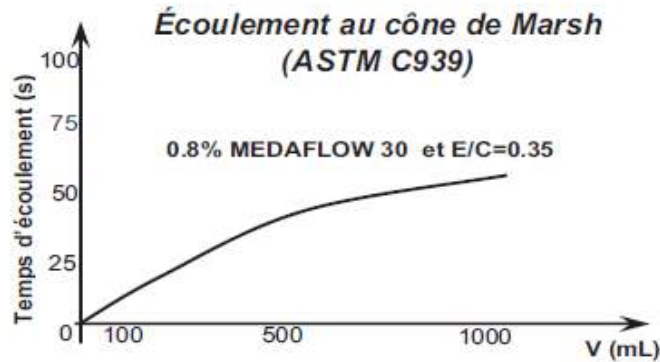


Figure A.1 : Variation de temps d'écoulements en fonction de volume pour 0,8 % MEDAFLOW 30 et E/C = 0.35.

A. 4 Superplastifiant Haut réducteur d'eau

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Tableau A.1 : les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme

Désignation	Rc (MPa)		
	3 Jours	7 Jours	28 Jours
MEDAFLOW 30 (1.4 %)	39.2	54.7	62.2

A.5 Les caractéristiques

- Aspect.....Liquid
- Couleur.....Brun clair
- pH.....6 _ 6.5
- Densité.....1.07 ±0.01
- Teneur en chlor.....< 0.1 g/l

- Extrait sec.....30 %

A.6 Mode d'emploi

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

A.7 Dosage

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

A.8 Conditionnement et stockage

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

A.9 Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

1.10 Les précaution d'emploi

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

ANNEXE B

Annexe B : Exemple de calcul de la composition du mortier

B.1 Les Données

Pour un volume du mortier de $V=1.31$ (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_C=3040 \text{ kg/m}^3$
- Sable : $\rho_S=1585,87 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{Sp}=1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $\rho_E=1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $A_b= 2,1\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.40$ ou (par volume) $E/C = 1.22$.

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

B.2 Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1=300 \text{ g}$ (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse $M_2 = 295 \text{ g}$ et on calcul l'humidité du sable μ_s :

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

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

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

B.3 Calcul des quantités de chaque constituant

B.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C%:

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

La quantité de ciment C en kg:

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

B.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

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

B.3.3 Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

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

B.3.4 L'eau

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

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

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

La quantité d'eau globale E en litre :

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

$$\text{Eau1 } E_1 = E \times 0.70$$

$$\text{Eau2 } E_2 = E \times 0.30$$

ANNEXE C

Annexe C : Exemple de calcul de la composition du béton

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe B) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

C.1 Les Données

Pour un volume de béton de $V=30$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - ❖ Masse volumique apparente du gravier: $\rho_G = 1358 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du gravier : $\rho_{AG} = 2707 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 1585,87 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - ❖ Coefficient d'absorption du sable : $AbS = 2,1 \%$
 - ❖ Coefficient d'absorption du gravier : $AbG = 0,855\%$
- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

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

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A=1\%$ du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}}=1.215$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.40$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : $\%Sp= 1,8\%$ du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

C.2 Calcul d'humidité

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

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

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

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

C.3 Calcul des différents composants

C.3.1 Gravier

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

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

C.3.2 Sable

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

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

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

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

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

Le pourcentage du sable S dans le béton :

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

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

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

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

C.3.3 Ciment

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

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

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

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

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

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

C.3.4 Superplastifiant

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

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

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

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

C.3.5 Eau

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

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

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

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

L'eau contenue dans le sable : e_1

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

L'eau contenue dans le gravier : e_2

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

L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

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

L'eau à extraire e : $e = e_1 + e_2 + e_3$

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

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

Avec :

$$\underline{\text{Eau1}} E_1(kg) = 0.70 \times E$$

$$\underline{\text{Eau2}} E_2(kg) = 0.30 \times E$$