

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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique

Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par : GRINI Abdelouaheb

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Contribution à l'étude de la ségrégation du béton fluide (Caractérisation par les ultrasons)

Devant le jury :

Pr. BENMALEK M. Larbi	Président	Université 8 Mai 1945	Guelma
Pr. BENOUIS Abdelhalim	Rapporteur	Université 8 Mai 1945	Guelma
Pr. CHERAIT Yacine	Examineur	Université 8 Mai 1945	Guelma
Pr. BELACHIA Mouloud	Examineur	Université 20 Aout 1955	Skikda
Pr. ARABI Nouredine	Examineur	Université Badji Mokhtar	Annaba
Pr. Naceri Abdelghani	Examineur	Université Mohamed Boudiaf	M'sila.

Soutenu le 02-05-2019

#

Remerciements

La présente étude a été réalisée au sein du département de Génie Civil et Hydraulique (GCH), Faculté des Sciences et de la Technologie à l'Université de Guelma. Elle a été rendue possible grâce à de nombreuses personnes que je voudrais remercier sincèrement.

Je tiens d'abord à remercier vivement monsieur le professeur Benouis Abdelhalim, mon directeur de thèse, pour son encadrement au cours de cette thèse et qui a eu toujours un grand enthousiasme à l'égard de ce travail. Il m'a transmis ses expériences scientifiques précieuses.

Je remercie vivement messieurs le professeur Guenfoud Mohamed, doyen de la faculté des sciences et de la technologie, le professeur Belabed Lazhar, chef du département de génie civil, et tous les enseignants du département, pour leurs aides précieuses.

Je voudrais ensuite exprimer ma profonde reconnaissance aux membres du jury : les professeurs Benmalek M. Larbi et Cherait Yacine de l'université de Guelma, les professeurs Arabi Noureddine et Naceri Abdelghani de l'université de M'sila ainsi que le professeur Belachia Mouloud de l'université de Skikda, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de constituer le jury et d'examiner le travail de ma thèse.

Je remercie le professeur Nouaouria M. Salah directeur du LGCH et tous les doctorants et personnels que j'ai rencontré au sein du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH. L'ambiance sympathique qui règne au sein de ce laboratoire constitue indéniablement l'une des clefs de l'aboutissement de ce travail.

Un grand merci à ma femme et à mon fils Oussama pour leur soutien et fidélités inestimables.

Enfin je voudrais adresser toute ma gratitude à ma grande famille, et plus particulièrement à mes parents, qui m'ont soutenu durant toutes mes longues années d'études.

Merci à tous !

TABLE DES MATIERES		
#	Remerciements	-
#	Résumé, ملخص, Summary	01
#	Introduction	04
#	Organisation du mémoire	07
Chapitre I. Propriétés des bétons frais.		
I.1-	Introduction	09
I.2-	Description du mécanisme de l'hydratation du ciment.	10
I.2.1-	Hydratation du silicate tricalcique « C3S ».	11
I.2.2-	Hydratation des aluminates.	14
I.2.3-	Prise du ciment.	15
I.2.4-	Réseau poreux	15
I.2.5-	Evolution de la porosité	15
I.2.6-	Conclusion	18
I.3-	Fluidité et ségrégation des bétons.	18
I.3.1-	Aspects théoriques	18
I.3.1.1-	Mouvement des particules dans des fluides.	18
I.3.1.2-	Mouvement d'une particule dans un fluide à seuil.	20
I.3.1.3-	Cas de plusieurs particules sphériques	22
I.4-	Fluidité des bétons.	22
I.4.1-	Caractérisation empirique.	22
I.4.2-	Mesures rhéologiques.	23
I.4.3-	Corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques.	26
I.4.4-	Mécanismes générant la fluidité.	28
I.4.4.1-	Théorie de l'excès de pâte.	28
I.4.4.2-	La phase fluide d'un béton.	31
I.5-	La ségrégation des bétons.	34
I.5.1-	Problème de la ségrégation.	34
I.5.2-	Ségrégation sous vibrations.	34
I.5.3-	Ségrégation en écoulement.	34
I.5.4-	Ségrégabilité.	35
I.6-	La caractérisation de la ségrégation.	36
I.6.1-	Introduction.	36
I.6.2-	Essais de caractérisation de la ségrégation.	36
I.6.2.1-	Ségrégation dynamique.	36
I.6.2.1.1-	Essais de caractérisation de l'aptitude au remplissage des bétons.	36
I.6.2.1.1.1-	Mesures rhéologiques au cône d'Abrams.	36
I.6.2.1.2-	Essais de caractérisation de la capacité de passage des bétons.	38
I.6.2.1.2.1-	L'essai à la L-Box.	38
I.6.2.1.2.2-	L'essai à la boîte en U (U-Box).	39
I.6.2.1.2.3-	L'essai J-ring.	39
I.6.2.2-	Ségrégation statique.	40
I.6.2.2.1-	Essai au tamis.	41
I.6.2.2.2-	Essai au cylindre.	42
I.6.2.2.3-	Essai à la colonne.	43

I.6.2.2.4-	Essai sur une colonne sans vibration.	44
I.6.2.2.5-	Essai à la bille.	44
I.6.2.2.6-	Essai à la palette	45
I.6.2.2.7-	Conclusion sur les essais disponibles.	45
I.7-	Conclusion	47
Chapitre II. Propagation des ondes ultrasoniques dans les milieux hétérogènes du génie civil.		
II.1-	Introduction	48
II.2-	Généralités sur les ondes ultrasonores	49
II.2.1-	Principe	49
II.3-	Equipement pour test de vitesse d'impulsion	54
II.4-	Forme et taille de l'échantillon	54
II.5-	Utilisation de transducteurs	54
II.6-	Auscultation sonique	55
II.7-	Les différents types des ondes ultrasonores	56
II.7.1-	Vibrations longitudinales	57
II.7.2-	Autres types d'ondes.	57
II.8-	Sensibilité des ondes de volume à la granulométrie et la composition des bétons.	59
II.8.1-	Influence du rapport E/C	59
II.8.2-	Influence du taux de saturation	59
II.8.3-	Influence des inclusions rocheuses (sables et granulats)	60
II.9-	Conclusion	61
Chapitre III. Méthodologie expérimentale		
III.1-	Procédure expérimentale	63
III.1.1-	Essais de stabilité au tamis	63
III.1.2-	Essais de stabilité à la colonne	64
III.1.3-	Procédé de test ultrasonique	65
III.2-	Matériaux utilisés	68
III.3-	Formulation des bétons d'étude	70
III.3.1-	Détermination des paramètres de formulation	71
III.4-	Composition des bétons.	72
III.4.1-	Dosage des granulats	72
III.4.2-	Vérification des compositions	73
III.4.2.1-	Gâchées d'essais et caractérisation des bétons	73
III.5-	Procédures des Essais.	77
III.5.1-	Caractérisation des bétons frais.	77
III.5.2-	Caractérisation de la ségrégation.	79
III.5.3-	Mesure des vitesses ultrasoniques	79
III.6-	Conclusion	79
Chapitre IV. Synthèse et interprétation des résultats		
IV.1-	Introduction.	82
IV.2-	Présentation des résultats	82
IV.2.1-	L'ouvrabilité	83
IV.2.2-	L'indice de ségrégation au tamis	84

IV.2.3-	L'indice de ségrégation à la colonne	84
IV.2.4-	L'indice ultrasonique de ségrégation	85
IV.2.5-	Conclusion	86
IV.3-	Effet de la composition sur les indices de ségrégation des bétons	87
IV.3.1-	Effet de du rapport E/L	87
IV.3.2-	Effet de du rapport F/L	90
IV.4-	Relations entre l'étalement et les indices de ségrégation	95
IV.5-	Corrélations entre les différents indices de ségrégation des bétons	99
IV.5.1-	Corrélations entre les indices au tamis et à la colonne	99
IV.5.2-	Corrélations entre les indices au tamis et ultrasonique	99
IV.5.3-	Corrélations entre les indices ultrasonique et à la colonne	100
IV.6-	Conclusions	102
Conclusions et perspectives		
#.1-	Conclusion générale	103
#.2-	Perspectives	105
Table de références		106
Annexes		
#A.1-	Formulation du béton	116
#A.2-	Composition chimiques et physiques du ciment	119
#A.3-	Composition chimiques et physiques du filler calcaire	120
#A.4-	Composition chimiques et physiques du super plastifiant	121

LISTE DES FIGURES

Figure I.1-	Image obtenue au MEB, de Portlandite dans la matrice d'un ciment.	11
Figure I.2-	Image obtenue au MEB, de l'ettringite aciculaire (aiguille) dans un ciment.	11
Figure I.3-	Evolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte silicate tricalcique(C3S).	13
Figure I.4-	Courbe calorimétrique typique reliant le taux de libération de la chaleur d'hydratation du <i>ciment</i> avec le temps [Vernet et Cadoret, 1991].	13
Figure I.5-	Représentation du caractère hétérogène d'un béton par la somme d'un squelette (Matrice solide + réseau poreux) et de fluides saturant l'espace poreux.	16
Figure I.6-	Evolution expérimentale en fonction du temps de la distribution poreuse d'une pâte de ciment (E/C = 0.4), maintenue à 24 °C, par intrusion au, tiré de [Brown et al. 1993] dans [Roy et al. 1993].	17
Figure I.7-	Particule sphérique rigide immergée dans un fluide est soumise à différentes forces	19
Figure I.8-	Champ d'écoulement autour d'une sphère immergée dans un fluide à seuil [Saak et al. 2001]	22
Figure I.9-	Essai d'étalement au cône d'Abrams	23
Figure I.10-	Modèles rhéologiques	24
Figure I.11-	Modèle de Bingham modifié [de Larrard et al ,1998]	25
Figure I.12-	Relation entre l'étalement et le seuil d'écoulement rapporté à la masse volumique (notée M) [Wallevik, 2003].	26
Figure I.13-	Comparaison entre des points expérimentaux et différentes expressions permettant de déterminer le seuil d'écoulement à partir de l'étalement [Jin, 2002]	27
Figure I.14-	Dispersion des granulats par excès de pâte.	28
Figure I.15-	Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton. [Yen et al, 1999].	28
Figure I.16-	(a) Mécanisme de déformation du mortier sous l'action du rapprochement des granulats, (b) Comparaison entre l'étalement du béton et celui du mortier en fonction de la fraction volumique de sable contenue dans le mortier.	29
Figure I.17-	Relation entre le seuil d'écoulement de la matrice cimentaire et la quantité de pâte requise pour obtenir un étalement de 650 mm [Pedersen et Smeplass, 2003].	30
Figure I.18-	Evolution du seuil d'écoulement et du saut de force normale en fonction de la fraction volumique de pâtes de C3S [Mansoutre, 2000]	31
Figure I.19-	(a) Corrélation entre l'étalement d'un béton et celui de son mortier. (b) corrélation entre l'étalement du béton et le seuil d'écoulement de son mortier.	33 33
Figure I.20-	Corrélation entre l'étalement d'un MBE et l'affaissement du béton et dimensions du cône MBE, homothétique du cône d'Abrams [PNC, 2001]	33
Figure I.21-	Figures de digitation observées au front d'un écoulement contenant des grosses particules.	34
Figure I.22-	Dispositif d'essai de mesure de la fluidité du béton : le cône d'Abrams.	37
Figure I.23-	Essais d'écoulement à travers des armatures « a la L-Box ».	38
Figure I.24-	Essais d'écoulement à travers des armatures « a la U-Box ».	39
Figure I.25-	Essais d'écoulement à travers des armatures « a la J-ring».	40
Figure I.26-	Essai de stabilité au tamis	41
Figure I.27-	Essai au cylindre, [Van Bui et al.2002].	42
Figure I.28-	Essai de stabilité à la colonne [RILEM.TC145]	43
Figure I.29-	Essai à la bille, [Trudel, 1995]	44
Figure I.30-	Essai d'extraction d'une palette métallique [Tangtermsirikul et al, 1991]	45
Figure II.1-	Échelle des ondes élastiques [D'après (Jacques, 2012)].	50
Figure II.2-	Diffusion par une hétérogénéité (D'après [Marie, 2006] et [Cuxac, 1991]).	52
Figure II.3-	Propagation et polarisation des ondes longitudinales et transversales (D'après [Marie 2006]).	56
Figure II.4-	Emplacement des transducteurs dans l'éprouvette	57
Figure II.5-	Propagation Longitudinale d'une onde acoustique	58
Figure II.6-	Propagation transverse d'une onde acoustique	58

Figure II.7-	Variations de l'atténuation des ondes P pour différents D_{max} , prises à différents endroits des spécimens, d'après [Landis and Shah ,1995].	61
Figure III.1-	a-Essai au tamis et critère de stabilité (ressuage à la surface) b-Critère de stabilité de l'essai au tamis	64
Figure III.2-	a-Dispositif de l'essai à la colonne b-Critère de stabilité de l'essai à la colonne	65
Figure III.3-	a-Essais ultrasoniques et critère ultrasonique de stabilité b- Dispositif utilisé pour la caractérisation ultrasonique de la ségrégation (LGCH, université de Guelma, Algérie)	66 66
Figure III.4-	Procédure de la détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons " f_u "	68
Figure III.5-	Courbes granulométriques du filler utilisé [ENG, 2012].	69
Figure III.6-	Courbes granulométriques des granulats utilisés	70
Figure III.7-	Procédures de caractérisation de la ségrégation des bétons	78
Figure III.8-	Evaluation visuelle de la stabilité apparente des bétons	78
Figure IV.1-	Diamètres d'étalement (Sf) des différents bétons.	83
Figure IV.2-	a- Indices de stabilité au tamis (π) b- Masses des gros granulats des différentes parties de la colonne. c- Vitesses ultrasoniques à travers les deux parties de la colonne	84 85 86
Figure IV.3-	Indices de ségrégation des différents bétons (tamis, colonne et UPV)	87
Figure IV.4-	a. Evolution de l'étalement en fonction du rapport E/L. b. Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport E/L. c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport E/L. d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport E/L.	88 88 89 89
Figure IV.5-	Evolution des indices de ségrégation (f_u , f et π) avec le rapport E/L.	90
Figure IV.6-	a. Evolution de l'étalement en fonction du rapport F/L. b. Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport F/L. c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport F/L. d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport F/L.	91 92 92 93
Figure IV.7-	Evolution des indices de ségrégation (π , f et f_u) avec le rapport F/L.	94
Figure IV.8-	a. Evolution de l'indice de stabilité au tamis en fonction du diamètre de l'étalement. b. Evolution de l'indice de ségrégation à la colonne en fonction du diamètre de l'étalement. c. Evolution de l'indice ultrasonique de ségrégation en fonction du diamètre de l'étalement.	95 96 96
Figure IV.9-	a. Relations entre l'écart type et les diamètres de l'étalement. b. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité à la colonne d. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité ultrasonique	97 98 98
Figure IV.10-	Relations entre les indices de stabilité au tamis (π) et de stabilité à la colonne (f)	99
Figure IV.11-	Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité au tamis (π)	100
Figure IV.12-	Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité à la colonne (f).	101
Figure IV.13-	Relations entre l'indice de stabilité au tamis (π) et les indices de ségrégation à la colonne et ultrasonique (f , f_u)	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. I.1-	Classification des pores dans la pâte de ciment hydraté [Young et coll. 1986].	16
Tableau. II.1-	Effect of specimen dimension on pulse transmission [Ould-Naffa et al. 2002]	55
Tableau. III.1-	Propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés.	69
Tableau.III.2-	Composition des bétons d'essai	73
Tableau.III.3-	a. Evolution de l'étalement du béton B1	74
	b. Evolution de l'étalement du béton B2	74
	c. Evolution de l'étalement du béton B3	74
	d. Paramètres de formulation et caractéristiques des bétons corrigées et ajustées	75
Tableau. III.4-	Dosage en fillers des bétons.	76
Tableau. III.5-	Compositions des mélanges testés.	76
Tableau. IV.1-	Les différents indices de ségrégation des bétons	82
Tableau. IV.2-	Résultats des essais de stabilité au tamis.	84
Tableau. IV.3-	Résultats des essais de ségrégation à la colonne	85
Tableau. IV.4-	Résultats des essais ultrasoniques	86

Résumé

La famille des bétons s'enrichit régulièrement depuis quelques années avec des bétons aux nouvelles performances, comme les bétons auto-plaçant (BAP) et autres. La majorité des auteurs s'accordent sur la nécessité de recourir à au moins deux essais empiriques différents pour établir des relations entre grandeurs spécifiques et caractéristiques rhéologiques des bétons pour caractériser d'une manière fiable le comportement du béton lors de l'écoulement.

La ségrégation est une de ces caractéristiques rhéologiques, elle se manifeste par la séparation involontaire des composants frais du béton ou du mortier. Elle peut avoir des impacts négatifs sur les propriétés mécaniques, le transport et la durabilité du produit durci. Ce travail étudie la possibilité de l'utilisation d'une technique non destructive "la vitesse d'impulsion ultrasonore (VIU)" comme moyen de caractériser la ségrégation dans le béton fluide et le béton auto-plaçant (BAP), ce dernier connue pour être particulièrement sujet à la ségrégation, à cause de son niveau de fluidité élevé.

Quatorze (14) compositions de béton ont été testées en utilisant des techniques standards (au tamis et à la colonne) ainsi que la vitesse d'impulsion ultrasonique proposée ici. Des corrélations ont été effectuées en fonction de différents indices de ségrégation afin de vérifier si la méthode VIU reflète bien l'état de ségrégation. Six (6) des quatorze (14) mélanges de béton étaient stables, en se référant aux indices de stabilité " π " et de résistance " f ", Ces six (6) compositions stables ont montré des valeurs de l'indice de ségrégation ultrasonique proches de 100%. On a constaté que les compositions de béton restantes étaient instables avec des valeurs de l'indice de ségrégation au tamis supérieures à 15%, les valeurs de l'indice de résistance " f " sont inférieures à 65%, et des indices de ségrégation ultrasonique " f_u " inférieurs à 80%. La méthode par vitesse d'impulsion ultrasonore pourrait être une alternative rapide et facile pour caractériser la ségrégation du béton frais et durci.

Mots clés : Béton fluide, ségrégation, stabilité, vitesse d'impulsion ultrasonique, corrélations.

تعززت أسرة الخرسانة، بشكل ملفت، في السنوات الأخيرة بخرسانات ذات مميزات جديدة، مثل الخرسانة ذاتية الدمك («BAP» (bétons auto-plaçant) وآخرون ...

يتفق معظم المؤلفين على ضرورة استعمال، على الأقل، اختبارين تجريبيين مختلفين لإقامة علاقات بين القيم الخصوصية والخصائص الريولوجية للخرسانة بغية الوصول إلى معرفة سلوكها أثناء الصب والتدفق بشكل موثوق به.

الفصل هو واحد من هذه الخصائص الريولوجية، ويتجلى ذلك بالفصل اللاإرادي للمكونات الطازجة للخرسانة أو الملاط، هذا الأخير يمكن أن يكون له تأثيرات سلبية على، الخواص الميكانيكية، النقل وديمومة الخرسانة المتصلبة. يدرس هذا العمل إمكانية استخدام تقنية غير مدمرة "سرعة النبض فوق الصوتي (UPV)" لتشخيص الفصل في الخرسانة السائلة والخرسانة ذاتية الدمك (BAP)، المعروف عنها أنها معرضة بشكل خاص للفصل بسبب سيولتها العالية، وذلك على غرار الاختبارات التجريبية الأكثر استخداماً (اختبار الانتشار، اختبار علبة "L"، اختبار الغربال، اختبار العمود).

أربعة عشر (14) عينة خرسانية مختلفة تم التجارب عليها باستخدام تقنيات القياس التقليدية (تجارب الغربال وتجارب العمود) وبطريقة سرعة النبض فوق الصوتية (UPV) المقترحة هنا. مقارنات أجريت وفقاً لمؤشرات الفصل المختلفة للتحقق ما إذا كانت طريقة UPV تعكس بصفة جيدة حالة الفصل. ستة (6) من أربعة عشر (14) خلطة خرسانية التي استعملت في هذا العمل وجدت، مستقرة حسب ما تبينه المؤشرات؛ مؤشر الغربال، مؤشر مقاومة الفصل. هذه العينات الستة (6) المستقرة، أظهرت قيم مؤشر الموجات فوق الصوتية قريبة من 100 %.

لاحظنا بالنسبة للعينات المتبقية فهي غير مستقرة، بقيم مؤشر فصل الغربال (π) أكبر من 15 %، قيم مؤشر المقاومة (f) أقل من 65 %، وقيم مؤشر الموجات فوق الصوتية " f_u " أقل من 80 %.

طريقة سرعة النبض فوق الصوتي يمكن أن تكون بديلاً سريعاً وسهلاً لتشخيص الفصل في الخرسانة الطازجة والمتصلبة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة السائلة، الفصل، الاستقرار، سرعة النبض فوق الصوتية، المقارنات.

The concrete family has been growing steadily for several years with new performances, such as self-consolidating concrete (SCC), and others. The majority of authors agree on the need for less than two empirical tests to establish relationships between specific and rheological quantities of concretes. The appearance of these factors is explained by the behavior of the concrete during the flow.

Segregation is the involuntary separation of fresh components from concrete or mortar, which can have negative impacts on the mechanical properties, transportation and durability of the cured product. To address this deficiency, this work investigates the potential for using ultrasonic pulse velocity (UPV) as a means of identifying and characterizing segregation in fluid concrete and self-consolidating concrete (SCC), the latter known to be particularly prone to segregation because of its high fluidity.

14 different concrete samples were tested using standard (sieve and column) techniques compared to the ultrasonic pulse velocity method proposed here. Correlations were performed according to different segregation indices to verify whether the UPV method is efficient and reliable compared to traditional methods. Six of the 14 concrete mixes were stable, as indicated by indices, sieve segregation and segregation resistance. These 6 stable samples showed values of the ultrasonic segregation index close to 100%. The remaining samples were found to be unstable concretes with sieve segregation index values greater than 15%, resistance index values " f " are less than 65%, and an index of ultrasonic segregation " f_u " less than 80%. The ultrasonic pulse velocity method could be a quick and easy alternative to testing the segregation of fresh and cured concrete.

Keywords: Fluid Concrete, Segregation, Stability, Ultrasonic pulse velocity, Correlations.

Introduction

La ségrégation est la séparation des composants d'un béton frais ou mortier. Quand la ségrégation se manifeste dans le béton, les gros grains se retrouvent souvent concentrés dans certaines sections et les grains fins dans d'autres. La ségrégation crée un mélange non uniforme qui ne correspond plus à la formulation du mélange initiale (granulométrie du contenu global) et par conséquent une mauvaise performance structurelle [Panesar et Shindman, 2012], et donc une courte espérance de vie et coûts d'entretien plus élevé.

La ségrégation peut se produire en raison de la composition du béton ou sa manipulation. Par exemple, la quantité d'eau et sa qualité sont sues pour influencer la séparation entre mortier et graviers [Li et al. 2013]. Pour éviter le risque de ségrégation et sa répercussion sur la résistance du béton à long terme, les mélanges eau-réducteurs sont souvent utilisés pour minimiser la quantité d'eau exigée pour produire du béton d'une certaine qualité. Malheureusement, ces mélanges (plastifiants, fluidifiants, parmi autres) peuvent causer un ressuage excessif ou conduisent aussi parfois à la ségrégation [Uysal et al. 2012]. Ce problème se manifeste dans les bétons ordinaires et ceux à haute performance [Ghafoori, et Diawara, 2010 ; Job et Harilal, 2014], tel que ceux qui contiennent des additions calcaires, même dans l'absence des signes externes, de l'eau ou des auréole de laitance [Khayat et Guizani, 1997 ; Bauchkar Sunil et Tâche 2014 ; Vakhshouri et Nejadi, 2016], mais présente un risque non négligeable pour les bétons auto-plaçants (BAP).

Le BAP a connu une réputation mondiale depuis sa première introduction dans les dernières décennies [Okamura et Ouchi, 2003]. Le BAP est caractérisé par sa capacité de mis en place sous son propre poids et sans vibration. L'idée est que, cet auto-compactage, a une influence fondamentale sur la capacité de couverture des barres de ferrailage et réduit le risque de ségrégation. Donc, le BAP peut améliorer considérablement la performance à long terme du béton sur site (comme il a été discuté largement par [Xie et al. 2002]. Avec le BAP le risque de la ségrégation provient généralement de sa haute fluidité ; typiquement le mélange d'un BAP a une quantité d'eau relativement faible (E/C rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La ségrégation se produit typiquement pendant la mise en place [Khayat et Feys, 2010], et l'hétérogénéité résultant peuvent compromettre la résistance et la durabilité dans ces régions.

Les essais de la ségrégation sont exécutées habituellement sur des échantillons de béton durci ou en cours de durcissement [Okamura et Ouchi,

2003 ; Shindoh et Matsuoka, 2003 ; Le Rakesh et al, 2015]. Ces essais sont de types destructifs, qui se fondent généralement sur des techniques de comptage du pourcentage des gros granulats. L'essai de stabilité au tamis mesure la portion de l'échantillon du béton frais qui traverse un tamis de 5mm. Si le béton a une résistance pauvre à la ségrégation, il peut traverser facilement le tamis, par conséquent, la portion tamisée indique si le béton est stable ou pas, [De Schutter et al. 2005]. Un autre essai utilisé est « l'essai de Cylindre » dans lequel la différence entre les pourcentages en poids de gros granulats, dans les sections du fond et du sommet, sont considérées [Ambroise et al. 1999, Rols et al. 1999].

Dans l'essai à la Colonne (lequel est aussi destructive) implique l'analyse d'échantillons du sommet et de la partie inférieure de la colonne, détermine la proportion du total des gros granulats [Cussigh et al, 2003], Cet appareil qui a été employé depuis longtemps [Sidky et al, 1981] et récemment, il a été évalué au niveau européen et il à été considéré comme suffisamment adaptable aux variations de conception des BAP [Cussigh et al, 2003].

Finalement parmi les essais destructives prédominantes est l'essai à la bille qui, dans un cylindre de dimensions pré-spécifiées, il permis de mesurer l'enfoncement d'une bille de même dimension que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton frais. La profondeur de la pénétration indique le niveau de la stabilité du BAP [De Schutter et al. 2005].

Il y a aussi des essais non-destructives dites « non-destructives testing (NDT) » abordés par [Kumavat et al. 2014 ; Mesbah et al. 2011 ; Silva et Brito, 2013]. Par exemple, [Breul et al. 2008] utilisent l'analyse d'image pour caractériser la ségrégation du béton sur site. Comme partie de ce travail effectuer sur le BAP à granulats recyclé, a été conduit sur colonnes de diamètre 16 centimètres. Le gamma densimètre a été aussi utilisé pour évaluer la ségrégation dans le béton [Schwhdenmann et al. 2005 ; Li et al. 2011 et Tribikram, 2014].

Par conséquent, beaucoup de méthodes (NDT) trouvent leurs applications dans l'industrie de la construction. La recherche intense dans ce champ a mené à validé des matériels NDT très sophistiqués qui rendent la collection du données plus rapide et plus facile. Par l'analyse adéquate des résultats issus de ces techniques NDT, c'est possible de prédire les importants paramètres du béton des structures, plutôt que de se limiter à détecter la qualité [Sanish et Manu, 2012].

La méthode des vitesses des pulsations ultrasoniques (VIU) est la plus largement utilisée des NDT pour l'inspection et l'évaluation de structures en béton que ce soit dans les sites et dans le laboratoire. L'VIU est principalement utilisé pour la détermination du module dynamique d'élasticité et du coefficient de Poisson [Huet, 1982]. On utilisant l'VIU, [Naik et Malhotra, 1991] et Malhotra et [Carino, 1991] ont démontré que la relation entre la résistance à la compression et la vitesse de pulsation ultrasonique était non-linéaire. Ils ont conclu que plusieurs paramètres peuvent influencés cette relation y compris la composition du béton et son taux d'humidité. Cependant ils existent des normes qui proposent, pour dépasser ces difficultés, des corrélations tel que [RILEM, 1973 ; ASTM, 2009 ; British, 2004]. L'hétérogénéité du béton crée des dispersions des pulsations [Guoxuan et al. 2011]. Ces dispersions sont causées par des facteurs indirects tel que l'origine du mélange du béton et les problèmes de la mise en place 'in-situ' (par exemple l'excès de vibration, la hauteur de chute). Plusieurs travaux appliquent l'VIU au béton, ne sont pas complets mais montrent ses potentialités telle que le travail de Benouis et Grini [Benouis et Grini, 2011] sur l'estimation de la porosité des bétons ou celui de Kumavat et al. [Kumavat et al. 2014] sur l'évaluation du béton dans les conditions générales.

Ces travaux indiquent que l'VIU devrait être une prometteuse technologie pour étudier la ségrégation du béton, parce que l'hétérogénéité du béton crée des dispersions de pulsations [Silva et Brito, 2013 ; Tribikram, 2014], et ces dispersions sont causées par les facteurs indirects tel que l'origine des granulats, les constituants du mélange et les problèmes de consolidation (vibration) pendant la mise en place du béton. Donc, comme a été noté par [Hamidian et al. 2012], l'VIU peut être appliqué au béton, à l'état frais ou au début de prise, pour établir des corrélations entre ces vitesses, l'indice de la ségrégation au tamis π , et l'indice de la résistance à la colonne f . Cela est basé sur le fait que la variation de la densité du béton à travers la hauteur d'un élément peut être déterminée par VIU et que le mortier et les granulats transmettent la vitesse des ultrasons distinctivement. Ces différences peuvent, par conséquent, être utilisées pour évaluer la quantité de granulats à travers la hauteur des éléments. Donc, l'objectif de cette étude expérimentale est d'analyser les corrélations entre les indices de la ségrégation et la vitesse de pulsation ultrasonique. Dans le but de proposer une alternative, rapide et non-destructive, de caractérisation de la ségrégation de bétons.

Organisation du mémoire

L'objectif de ce mémoire étant de caractériser la ségrégation du béton par une technique non destructive, notre étude expérimentale s'articule principalement sur des essais comparatifs de ségrégation par des essais classiques (au tamis et à la colonne) et des essais de mesure des vitesses des ultrasons sur les mêmes éprouvettes.

Le mémoire décrit les démarches scientifiques adoptées, les résultats obtenus et l'analyse qui en a été faite.

Le premier chapitre est consacré aux propriétés des bétons frais, en commençant par la description du mécanisme de l'hydratation du ciment et les conséquences physiques de l'hydratation sur la création d'un milieu poreux. La cohésion et la rigidité de la matrice solide sont procurées par l'augmentation des produits d'hydratation. Ensuite ce chapitre s'intéresse au phénomène de ségrégation qui se manifeste par la séparation des phases du béton et les essais traditionnels de sa caractérisation.

Le deuxième chapitre qui porte sur les notions d'excitation et de propagation des ondes ultrasonores et leurs applications dans la détermination de quelques propriétés des bétons ainsi que sur les caractéristiques et causes d'atténuation des signaux ultrasoniques et en fin l'application de la technique des ultrasons au cas du béton avec sa sensibilité des ondes ultrasoniques à la granulométrie et la composition des bétons,.

Cette synthèse bibliographique a permis de construire notre méthodologie expérimentale.

L'étude expérimentale est abordée à partir du troisième chapitre, par l'exposition de la méthodologie expérimentale adoptée et la caractérisation des différents matériaux utilisés. Ainsi quatorze (14) compositions de bétons sont proposées pour les essais avec des variations des rapports E/L et F/L , le rapport (S_p/L) étant maintenue proche à la saturation. La méthodologie expérimentale suivie s'articule principalement sur des mesures des indices de ségrégation (indice de stabilité au tamis et indice de résistance à la colonne) et des mesures des vitesses des ultrasons (donnant des indices de ségrégation ultrasoniques).

Enfin, Quatrième chapitre aborde l'interprétation et l'exploitation des résultats expérimentaux réalisés.

Divers relations ont été étudiées, elles ont concernés l'évolution des vitesses en fonction de divers paramètres tels que, le rapport (E/L) et le rapport (F/L), et les corrélations entre les vitesses des ultrasons (indices ultrasonores) et les autres indices de ségrégation.

Le mémoire est terminé par une conclusion générale ainsi que des perspectives futures à ce travail.

I.1- Introduction

Le béton est un matériau évolutif, dont la maturation progressive se caractérise par le passage d'un état presque liquide à un matériau viscoélastique en l'espace de quelques heures, suivi d'une évolution ultérieure vers un matériau durci présentant des résistances mécaniques importantes.

Parmi les différents types de bétons, le Béton à Haute Performance (BHP), dont utilisation intensive (au cours des dernières années) a été motivée par les résistances élevées, la bonne ouvrabilité, et la bonne durabilité obtenues. Toutefois, les recherches effectuées sur le BHP ont montré que le faible rapport E/C employé mène à une réduction plus prononcée du volume du béton, et à une plus grande sensibilité à la fissuration. Ceci n'est pas seulement une conséquence de la chaleur d'hydratation, mais également la conséquence du retrait endogène et du retrait d'auto-dessiccation qui se produisent au jeune âge.

Le béton comme tous les matériaux cimentaires subit des variations de volume significatives, qui se manifestent dès les premières heures qui suivent sa fabrication, et qui sont provoquées en grande partie par l'hydratation du ciment [Byfors, 1980].

En pratique, il arrive que ces changements volumiques soient si importants qu'ils mènent à la fissuration de l'ouvrage. Au cours des dernières années, de nombreuses études ont ainsi démontré que les problèmes de fissuration du béton au jeune âge peuvent être directement liés aux déformations endogènes de la pâte de ciment [Igarashi et al. 2000] ; [Lachemi et al. 2001], [Ulm et al. 2001], qui sont produites dès les premières heures de la réaction d'hydratation. Toutefois, la connaissance incomplète des propriétés du béton au jeune âge limite la possibilité d'étudier les structures en béton et complique les prévisions de fissuration dans les jours qui suivent la mise en place du béton.

La caractérisation du comportement des matériaux cimentaires à l'état frais n'est en effet pas simple. Ceci qui est d'autant plus vrai lorsque la composition fait intervenir un super-plastifiant associé à un agent viscosant. Cependant les études numériques ou expérimentales dans des fluides modèles fournissent des pistes pour la compréhension des mécanismes de ségrégation statique [Tangtermsirikul et al. 2000] et [Hu, 1995]. Le comportement d'un granulat sera alors assimilé à celui d'une sphère.

Ce chapitre traite donc ; **en premier lieu**, de la description du processus d'hydratation des constituants principaux du ciment. Pour suivre l'évolution du béton au jeune âge, le degré d'hydratation apparaît comme le paramètre fondamental qui caractérise l'état de la pâte, et les différentes définitions de ce paramètre sont passées en revue avant de

s'intéresser aux techniques expérimentales existantes pour sa détermination. L'étude des processus d'hydratation conduit naturellement à s'intéresser à la cinétique d'hydratation, et on définit ensuite la notion de maturité.

En 2^{ème} lieu, de la corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques de la fluidité ainsi que les mécanismes générant cette fluidité et en 3^{ème} lieu, les essais de caractérisation de la ségrégation qui, s'agit de trouver un compromis entre deux caractéristiques qui peuvent sembler contradictoires : fluidité et stabilité.

I.2- Description du mécanisme de l'hydratation du ciment.

Le béton est un mélange de plusieurs composants, les agrégats, le sable, le ciment et l'eau. Parmi ces derniers, le composant le plus important est le ciment, dont la propriété essentielle est de durcir au contact de l'eau. C'est pour cette raison qu'on l'appelle le liant hydrique du béton. [Taylor, 1990] a défini de manière générale l'hydratation du ciment par " L'ensemble des changements qui se produisent quand un ciment anhydre, ou une de ses phases constitutives, est mélangé avec de l'eau". Dès que le ciment anhydre est mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés du béton ainsi obtenu évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée le béton reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée.

Les composants du ciment sont les suivants :

1. le clinker
2. le sulfate de calcium
3. les ajouts éventuels (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers et les fumées de silice)

Le clinker est obtenu par un broyage à haute température (1450°C) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire. Les composés minéralogiques principaux du clinker sont :

1. Les silicates.
 - Tricalcique (*Alite*) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S).
 - Bi-calcique (*Belite*): $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S).
2. Les aluminates
 - Tricalcique : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A).
 - Ferro-aluminate tétra-calcique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Les termes C_3 , C_2 ..., se rapportent aux abréviations suivantes, utilisées en chimie du ciment

$\text{C} = \text{CaO}$: la Chaux,

$\text{S} = \text{SiO}_2$: la Silice,

$\bar{\text{S}} = \text{SO}_3$: le trioxyde de soufre,

$\bar{\text{C}} = \text{CO}_2$: le dioxyde de carbone,

H = H₂O : l'eau,
 F = Fe₂O₃ : la Ferrite.

Le mélange de ciment et d'eau forme une pâte qui se rigidifie progressivement et devient solide après un délai de quelques heures : c'est le phénomène de prise du ciment. La prise du ciment est le résultat de réactions entre l'eau et les constituants du ciment anhydre.

Le principal produit de l'hydratation est le silicate de calcium hydraté $CaO.SiO_2.H_2O$ ou *C-S-H*, Figure (I.1), [Mitani, 2003], l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ (CH) appelé portlandite, et les aluminates hydroxyde de calcium sous forme d'étringite *AFt* (trisulfo-aluminate), Figure (I.2), [Mitani, 2003] et mono sulfo-aluminates *AFm*.

Le sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Il peut se présenter sous forme de gypse (CaSO₄.2H₂O), d'hémihydrate (CaSO₄.1/2 H₂O) ou de mélange des deux. Le gypse est souvent associé à de l'anhydrite (CaSO₄).

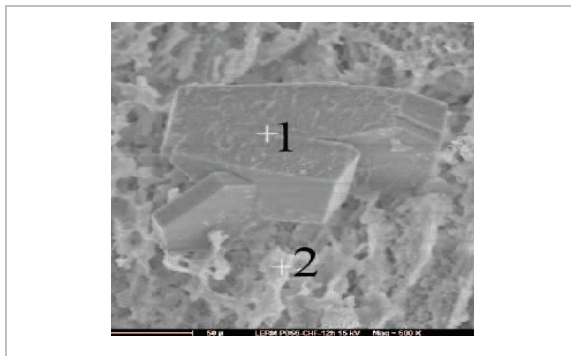


Figure I.1 - Image obtenue au MEB de Portlandite dans la matrice, Échantillon CEM III/B 12h, 1 = Portlandite, 2 = C-S-H.

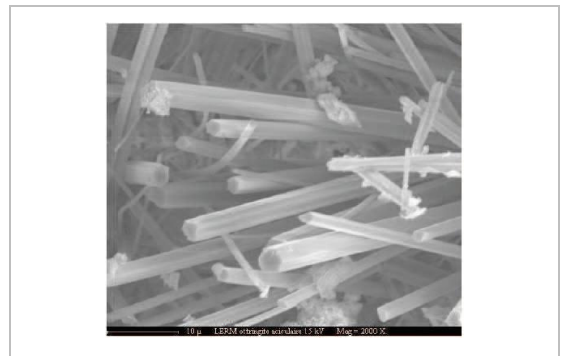
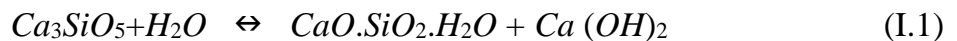


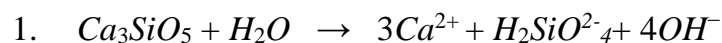
Figure I.2- Image obtenue au MEB, MEB de Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.

I.2.1- Hydratation du C₃S.

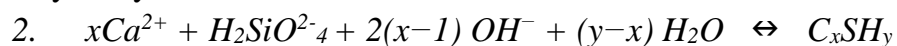
Le constituant majoritaire du ciment anhydre est le silicate tricalcique C₃S. L'hydratation du C₃S produit un silicate de calcium hydraté, C-S-H, et de la Portlandite Ca(OH)₂ (C-H). L'équation globale de l'hydratation du C₃S est la suivante [Le Chatelier, 1904] :



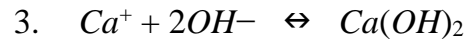
Dans cette écriture la stœchiométrie du C-S-H n'est pas précisée. L'hydratation du C₃S procède selon trois réactions qui deviennent successivement simultanées [Barret et Bertrandie, 1986] :



Cette première étape consiste en la dissolution congruente des grains de Ca₃S superficiellement hydroxylés.



Les ions silicates ayant atteint la limite de leur sursaturation, précipitent tandis que la dissolution des grains de Ca_3S se poursuit.



La troisième réaction du système est la précipitation des ions calcium sous forme de Portlandite, Figure (I.1). La stœchiométrie du $C-S-H$ dépend des concentrations en ions calcium et silicate dans la solution d'hydratation. Le paramètre le plus courant pour caractériser la stœchiométrie du $C-S-H$ est le rapport entre le nombre d'atomes de calcium et le nombre d'atomes de silicium dans la structure : le rapport C/S . Ce rapport varie, dans les $C-S-H$, entre $C/S = 0,7$ et 2 , [Klur, 1996]. La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie par des mesures de calorimétrie et de conductivité, qui sont décrites plus bas. L'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes, que [Barcelo, 2001] décrit de la manière suivante :

Période 1 : Réactions initiales.

Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions SiO_4^- qui sont situés en surface des grains passent en solution. La présence de ces ions provoque une augmentation de la conductivité électrique du milieu. Une couche protectrice de $C-S-H$ se forme alors autour des grains et empêche la réaction entre les silicates et l'eau. Par conséquent la dissolution du C_3S devient très lente après quelques minutes, et la première période se termine rapidement.

Période 2 : Période d'induction ou période dormante.

Durant cette période il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur. Ainsi la concentration en calcium croît alors que la concentration en silice décroît. La conductivité augmente mais plus faiblement que lors de la première période. Les $C-S-H$ dits métastables ($C-S-H(m)$) continuent de se former autour des grains de C_3S alors que la Portlandite ne précipite pas. Cette période est dite dormante car le degré d'hydratation ξ reste faible et quasiment constant.

– **Période 3** : Période d'accélération.

La caractéristique de cette période est le fort dégagement de chaleur qui traduit une activité chimique intense. C'est pendant cette période que survient la prise, deux types de réactions mènent à la formation de ($C-S-H$) dits ($C-S-H(s)$) et de Portlandite. La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle. Cette période s'accompagne également d'une baisse importante de la conductivité, Figure (I.3), [Vernet et Cadoret, 1991].

– **Période 4** : Période de décélération.

La formation de la couche d'hydrates ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion à travers la couche d'hydrates déjà formés. En conséquence, la cinétique d'hydratation ralentit avec le temps. A mesure que les hydrates se forment, les ions

disparaissent de la solution interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité électrique. Il apparaît également une diminution de la chaleur dégagée pendant cette période.

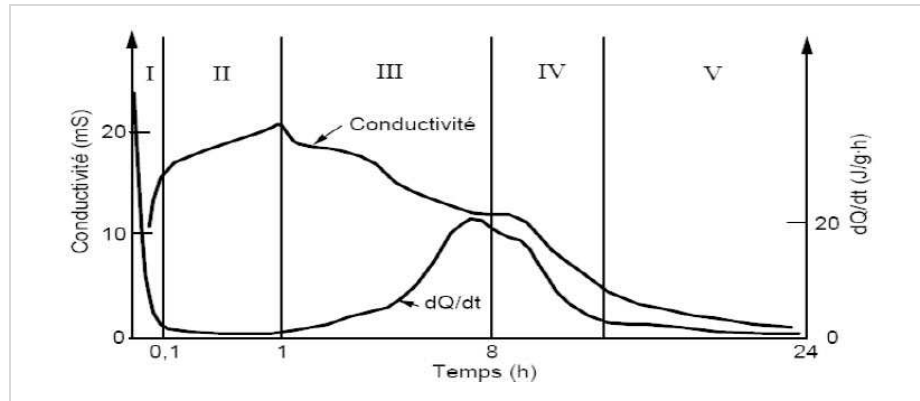


Figure I.3 - Evolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C3S.

– **Période 5** : Période de consolidation.

Cette dernière période est considérée comme quasi-stable. Le ralentissement de la réaction, du au caractère diffusif de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années. Cette période est très importante du point de vue du développement de la résistance mécanique, car elle commence très tôt, après un jour d'hydratation, et persiste longtemps après. D'après la description qui vient d'être donnée de l'hydratation des silicates, il apparaît que l'évolution de la chaleur d'hydratation passe par un premier maximum, diminue à un minimum pendant la période d'induction, passe ensuite par une deuxième maximum et diminue finalement de façon progressive [Taylor, 1990], Figure (I.4), [Brown *et al.* 1986].

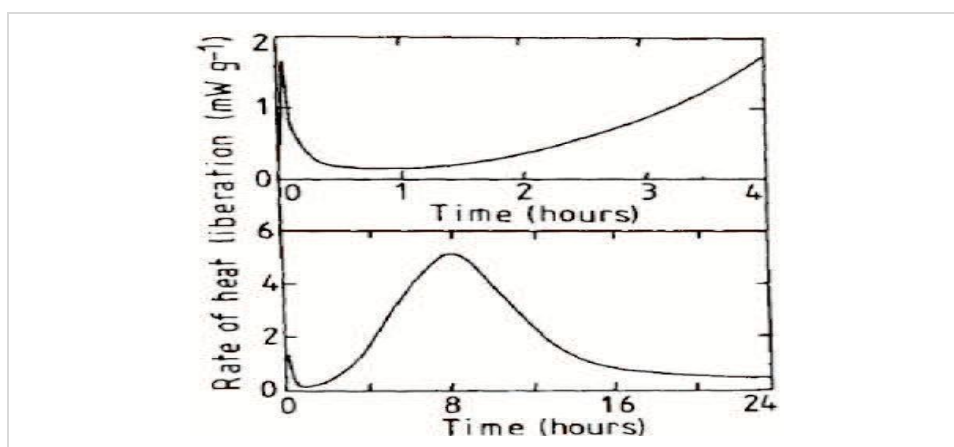


Figure I.4- Courbe calorimétrique typique reliant le taux de libération de la chaleur d'hydratation du C₃S avec le temps.

I.2.2- Hydratation des aluminates

L'hydratation des aluminates étant très rapide, les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [Taylor, 1990]. L'Aluminate Tricalcique C_3A est responsable du phénomène de "prise éclair" qui conduit à la formation d'aluminates hydratés. Les hydrates issus de l'Aluminate Ferro aluminate, C_4AF , se déduisent de ceux du C_3A par substitution de l'alumine Al_2O_3 par l'alumino-ferrite ($Al_2O_3.Fe_2O_3$) dans les formules chimiques. Pour cette raison, nous présentons seulement l'hydratation du C_3A .

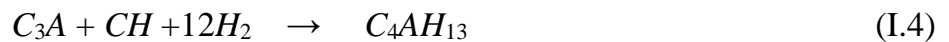
En l'absence de sulfates, le C_3A est très réactif lorsqu'il entre en contact avec l'eau.

En revanche son hydratation est régulée en présence de gypse, et conduit à la formation de tri-sulfo-aluminate de calcium hydraté (**T-S-A**) ou étringite.

L'étringite n'est un produit hydraté stable que lorsque la quantité de gypse est suffisante.

Dans la majorité de cas, le C_3A est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le C_3A n'est pas complètement hydraté, l'étringite se transforme en monosulfo-aluminate tétra-calcique (MSA). De plus, s'il reste du C_3A après la formation du monosulfo-aluminate tétra-calcique, il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate du type $C_3A, 1-xCH, H_{19}$.

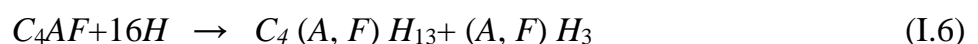
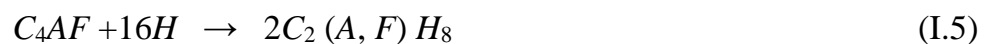
Les réactions sont résumées par les équations suivantes [Taylor, 1990] :



Le C_3A et le gypse se dissolvent les premiers lors de l'hydratation du ciment. Le C_3A est ensuite recouvert d'une couche protectrice d'étringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recristalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques. C'est pourquoi la présence d'étringite fragilise le matériau [Regourd, 1982b]. L'étringite et les monosulfates représentent environ (20–30%) du ciment hydraté. La vitesse de recristallisation de l'étringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de conserver la maniabilité de la pâte dans les premières heures.

La phase ferritique C_4AF constitue environ (8–13%) d'un ciment Portland. Cette phase est en réalité une solution solide dont la composition répond à la formule $C_2 (Ax, F^{1-x})$ pour x compris entre 0 et 0.7 [Ramachandran, 1995].

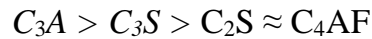
De nombreuses études ont montré que l'hydratation des phases C_4AF se rapproche de celle du C_3A lors que les conditions d'hydratation sont identiques [Taylor, 1990]. En présence d'eau, le C_4AF réagit de la manière suivante avec $(A, F) = (A_x, F^{1-x})$:



En présence de gypse l'hydratation du C_4AF est plus efficacement retardée que celle du C_3A [Fukuhara *et al.* 1981].

I.2.3- Prise du ciment

La réaction d'hydratation du ciment Portland va combiner les réactions d'hydratation des principaux constituants du clinker. D'une manière générale, la réactivité avec l'eau des différentes phases minérales d'un ciment respecte l'ordre suivant :



Au cours de l'hydratation du ciment, la pâte se rigidifie puis durcit. Cependant la prise du ciment n'est pas uniquement liée à la quantité d'hydrates formée. La structuration et la prise peuvent être caractérisées par deux processus fondamentaux : la coagulation et la rigidification [Jiang *et al.* 1995]. La coagulation correspond à la formation de contacts entre particules par interactions réversibles. La forte augmentation de la force ionique de la solution au cours de l'hydratation est à l'origine d'une diminution de la portée de la répulsion électrostatique due à une diminution de la longueur de Debye entre les grains partiellement hydratés. [Nonat et Mutin, 1992] ; [Nachbaur *et al.* 2001]. La réversibilité de ce phénomène permet à la pâte de conserver sa maniabilité pendant la période dormante.

1.2.4- Définition du réseau poreux

La structure des matériaux cimentaires est un milieu poreux saturé ou partiellement saturé d'eau dans lequel on retrouve une matrice solide, une phase liquide, une phase gazeuse et, le cas échéant, des espaces vides. Les pores, qu'ils soient vides ou saturés, peuvent être interconnectés ou isolés. La porosité représente l'ensemble de ce volume total de vide, Figure I.5.

Les bulles d'air qui apparaissent dans le matériau lors du malaxage ne sont pas considérées dans cette étude. La présence de ce volume de vide est négligée, comme dans la plupart des approches, [Hua 1995] ; [Bissonnette *et al.* 2000].

1.2.5- Evolution de la porosité

Le réseau poreux de la pâte de ciment hydraté est déterminé par l'agencement des divers produits d'hydratation. Différentes tailles de pores existent dans un béton : vides d'air entraînés lors du malaxage, pores capillaires dus à l'eau de gâchage, micropores apparaissant au fur et à mesure de l'évolution de la réaction d'hydratation (Tableau I.1). Le réseau poreux d'un béton peut être caractérisé par deux grandes familles de pores : la porosité intrinsèque des hydrates (nanomètre) et la porosité capillaire (espaces résiduels entre les grains de ciment non comblés par les hydrates).

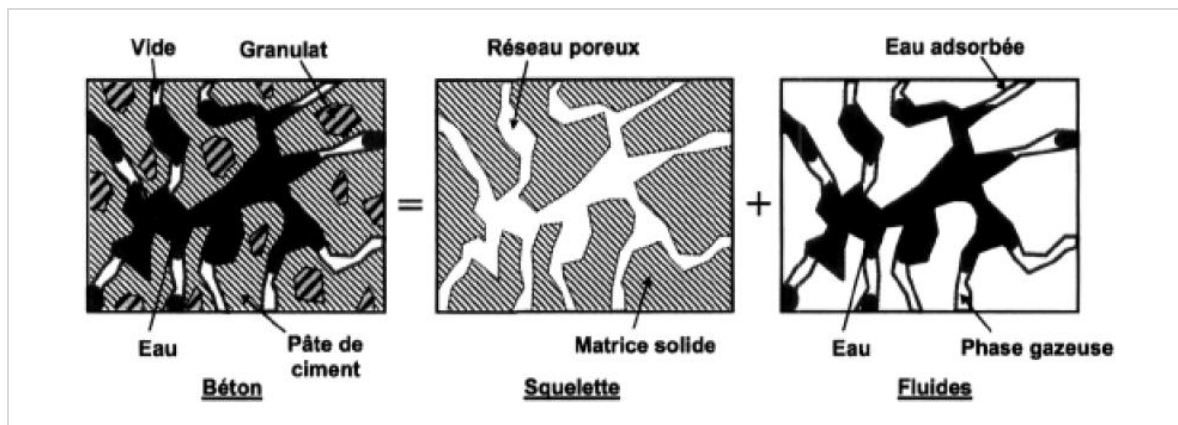


Figure I.5 - Représentation du caractère hétérogène d'un béton par la somme d'un squelette (Matrice solide + réseau poreux) et de fluides saturant l'espace poreux.

Le volume des pores de gel (porosité des hydrates) augmente avec l'hydratation alors que les pores capillaires, représentant le volume poreux non rempli par les produits d'hydratation, diminue à mesure que progresse l'hydratation [Neville 2000].

Comme le montre la Figure I.6, la porosité totale d'un matériau cimentaire, déterminée expérimentalement par intrusion au mercure, diminue progressivement au fur et à mesure de l'avancée de la réaction d'hydratation [Roy et al. 1993].

Tableau I.1 - Classification des pores dans la pâte de ciment hydraté (Young et coll. 1986 cité dans [Bissonnette 1996]).

Désignation	Diamètre	Particularités
micropores	< 2,5 nm	partie intégrante des CSH
Méso-pores	2,5 - 50 nm	pores capillaires
Macro-pores	50nm - 10 µm	
vides d'air entraîné	10 µm- 0,1 mm	non reliés directement aux mécanismes de retrait et de fluage
vides d'air occlus		
microfissures préexistantes		

En cours d'hydratation, après la prise du matériau ($t > t_0$) et pour un milieu réactif fermé (sans échange d'humidité avec l'extérieur), le volume poreux total (V_p) d'un béton correspond à la somme du volume d'eau évaporable (V_e) et du volume de vide (V_v). Ainsi :

$$V_p(t) = V_e(t) + V_v(t) \quad (I.7)$$

La porosité lagrangienne (p) se caractérise par la relation suivante :

$$(p)(t) = V_p(t)/V_t(t_0) \quad (I.8)$$

Le volume d'eau évaporable $V_e(t)$ diminue en fonction de la quantité d'eau consommée pour former les hydrates comme le montre la relation suivante où ρ représente la masse volumique de l'eau :

$$V_e(t) = [m_e(t=0) - m_{eI}(t)] / \rho \quad (I.9)$$

La diminution expérimentale de la porosité totale peut être retrouvée théoriquement par les deux expressions précédentes. En effet, en fonction de l'hydratation et des travaux de [Bresson 2005], le volume d'eau liée (0.23 g/g de ciment hydraté) est supérieur au volume de vide créé par la contraction des hydrates. De même, la distribution poreuse (volume poreux en fonction du rayon de pore) évolue avec l'hydratation. La Figure I.6, montre clairement que plus l'hydratation, avance plus la distribution poreuse tend vers des pores de petites tailles.

Pour un milieu fermé, si au départ (prise du matériau) les pores sont saturés d'eau, le degré de saturation en eau S_i va diminuer avec l'hydratation puisqu'un volume de vide va apparaître progressivement dans le réseau :

$$S_i(t) = V_e(t) / V_p(t) \quad (I.10)$$

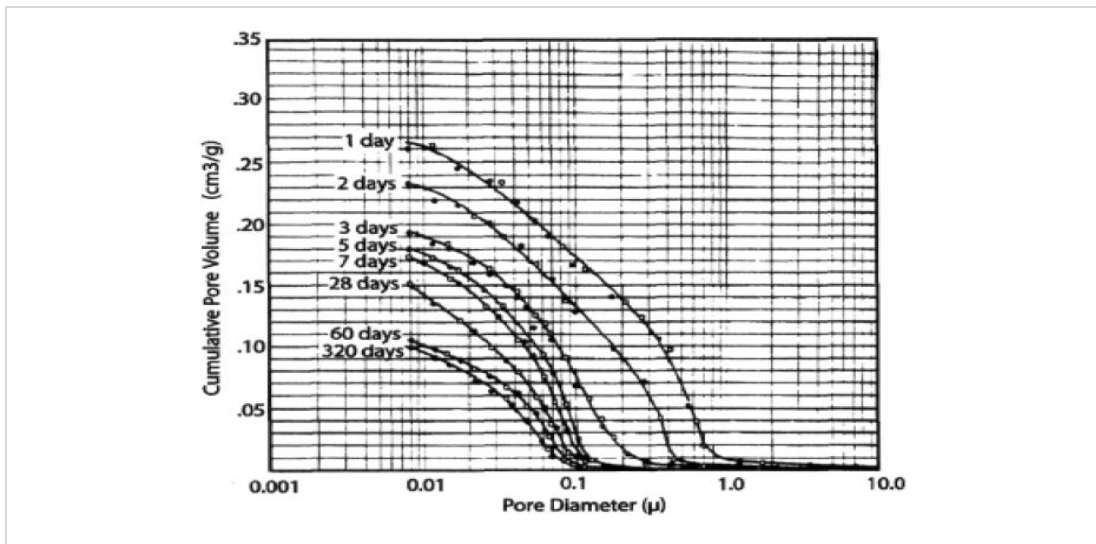


Figure I.6- Evolution expérimentale en fonction du temps de la distribution poreuse d'une pâte de ciment ($E/C = 0.4$), maintenue à 24 °C, par intrusion au, tiré de [Brown et al. 1993] dans [Roy et al. 1993].

Cette diminution du degré de saturation apparaît en premier lieu dans les pores de grandes tailles, comme pour le séchage, soit les capillaires [Baron et al. 1982].

Les pores capillaires jouent un rôle important sur les propriétés mécaniques, sur les propriétés de transport et sur la stabilité volumique (retrait et fluage). Les pores capillaires contrôlent, par exemple, la perméabilité des pâtes de ciment. L'hydratation entraîne une augmentation du volume de la matrice solide. Au fur et à mesure de l'avancement de la réaction d'hydratation, la quantité de grains anhydres et la porosité capillaire diminuent (remplissage progressif des capillaires par les hydrates). A l'inverse, la fraction volumique d'hydrates et la nano-porosité (eau emprisonnée par les hydrates lors de leur formation), par conséquent, augmentent.

I.2.6- Conclusion.

L'hydratation entre le ciment et l'eau, qui est caractérisée par une réaction complexe mettant en jeu plusieurs mécanismes, peut être modélisée à l'échelle macroscopique par un degré d'hydratation global. Pour les bétons, cette hydratation est à l'origine de l'évolution d'une microstructure hétérogène vue comme un milieu poreux évolutif composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux. Une approche simplifiée de l'évolution de la microstructure basée sur l'équation de conservation de masse permet de connaître les évolutions volumiques de chaque composant du milieu poreux en fonction de l'avancement de la réaction d'hydratation.

Le volume poreux, qui au départ correspond à la quantité d'eau libre présente au malaxage, va diminuer au fur et à mesure que l'hydratation progresse. Pour un milieu fermé (sans échange hydrique avec l'extérieur du matériau), un volume de vide, provoqué par la contraction des hydrates, apparaît dans ce réseau poreux engendrant une diminution de la saturation en eau et par conséquent de l'humidité relative. L'augmentation de ce volume de vide dans la porosité entraîne également une diminution de l'épaisseur de l'eau adsorbée à la surface des pores.

L'évolution de l'hydratation se traduit à l'échelle macroscopique par une évolution des propriétés mécaniques et des déformations endogènes.

I.3- Fluidité et ségrégation des bétons.

I.3.1- Aspects théoriques

La caractérisation du comportement des matériaux cimentaires à l'état frais n'est en effet pas simple. Ceci qui est d'autant plus vrai lorsque la composition fait intervenir un super-plastifiant associé à un agent viscosant. Cependant les études numériques ou expérimentales dans des fluides modèles fournissent des pistes pour la compréhension des mécanismes de ségrégation statique [Tangtermsirikul et al. 2000] et [Hu, 1995]. Le comportement d'un granulat sera alors assimilé à celui d'une sphère.

I.3.1.1- Mouvement des particules dans les fluides

Dans la littérature résultent de simulations numériques de chute de sphère(s) dans des fluides, une particule sphérique rigide immergée dans un fluide est soumise à différentes forces : la force de gravité, la poussée d'Archimède et la force de traînée Figure I.7.

Avec, $F_g = mg$.

$F_A = m g$

$m = \text{masse du granulat},$

g = accélération de la pesanteur,
 m : masse de liquide déplacée par la particule.

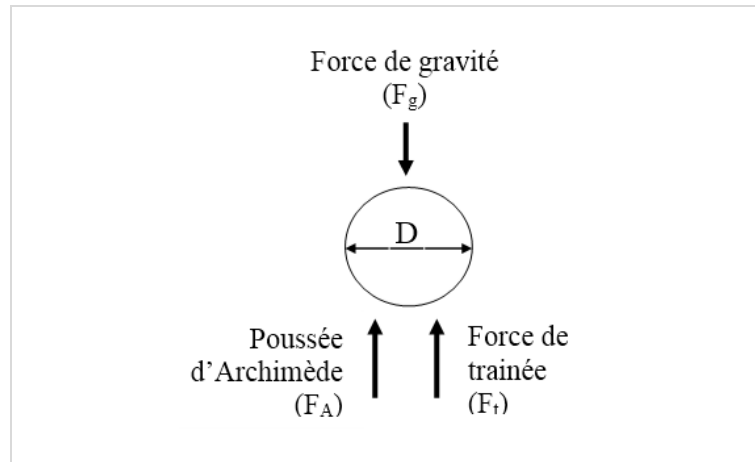


Figure I.7- Particule sphérique rigide immergée dans un fluide est soumise à différentes forces

La force de traînée dépend quant à elle des caractéristiques du milieu et doit être définie :

$$F_t = F_g + mg. \quad (\text{I.11})$$

$$F_t = \rho_s V_p g - \rho_f V_p g \quad (\text{I.12})$$

V_p : volume de la particule.

Dans le cas d'une sphère :

$$F_t = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho_s - \rho_f) \cdot g \quad (\text{I.13})$$

Avec R , rayon et D , diamètre de la sphère, ρ_s : masse volumique de la sphère, ρ_f : masse volumique du fluide

D'après [Saak et al. 2001], cette force est proportionnelle au seuil d'écoulement et prend la forme :

$$F_t = \tau_0 A_s \quad (\text{I.14})$$

A_s étant la surface de la sphère, τ_0 : seuil d'écoulement du fluide.

Pour maintenir la sphère en équilibre [Saak et al. 2001] propose l'expression de la contrainte de cisaillement minimum

$$\tau_0 \geq \frac{2}{3} g (\rho_s - \rho_f) D \quad (\text{I.15})$$

[Chabra, 1993] a effectué une synthèse des études parues, qui mènent à un critère de stabilité pour une sphère immergée dans un fluide à seuil. Il montre qu'il existe un paramètre adimensionnel caractérisant la stabilité tel que :

$$Y_c = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_f) g D} \quad (\text{I.16})$$

Les valeurs de ce paramètre obtenues par les différents auteurs couvrent une très large gamme $0,04 < Y_c < 0,212$.

Le diamètre minimum D_c de la sphère nécessaire pour dépasser le seuil d'écoulement τ_0 lorsque la sphère n'est pas en mouvement, [He et al. 2001] remarquent que l'exactitude du calcul du diamètre critique D_c dépend de la précision de la mesure du seuil ;

$$D_c = \frac{18 \tau_0}{(\rho_s - \rho_f)g} \quad (I.17)$$

La valeur de la constante de stabilité Y_c diffère selon les auteurs. [Saak et al. 2001] proposent $Y_c=0.66$. Divers études ont donc permis de dégager différentes valeurs de la constante Y_c pour une sphère immergée dans un fluide à seuil de contrainte, sans toutefois en associer une au problème posé. En effet, seule l'étude de [Saak et al. 2001] portait sur une pâte de ciment.

Il s'agit donc, de trouver un compromis entre la nécessité de réduire le seuil d'écoulement pour que l'écoulement s'amorce rapidement et celle d'avoir un seuil suffisant pour supporter le poids des gros granulats. Nous avons vu que la réduction du seuil d'écoulement est obtenue par ajout de superplastifiant. Il s'agit donc de contrôler le dosage en superplastifiant [Flatt, 2004]. De plus, pour un seuil d'écoulement donné, le risque de ségrégation est d'autant plus élevé que le diamètre augmente. Comme pour le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats doit donc être limité.

I.3.1.2- Mouvement d'une particule dans un fluide à seuil

Dans le cas d'un fluide newtonien, il est introduit un coefficient de traînée C_d permettant d'adimensionner la force de traînée, F_{stokes} , tel que :

$$F_{stokes} = C_d \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \rho_f v^2 \quad (I-18)$$

Avec, $C_d=24/R_e$ $R_e = \frac{\rho_f v D}{\mu}$, Le nombre de Reynolds, μ ; étant la viscosité absolue.

Cette équation n'est valable que pour les fluides newtoniens. Certains auteurs ont donc proposé différentes expressions du coefficient de traînée lorsque la sphère est en mouvement dans d'autres fluides. [Chhabra, 1993] donne une revue de ces équations et il apparaît que les différents auteurs arrivent à une même conclusion : dans le cas d'un fluide à seuil, la traînée d'une sphère dépend de deux paramètres : la viscosité et le seuil d'écoulement du fluide.

Ainsi, pour prendre en compte les effets visqueux mais également les effets dus au seuil d'écoulement, les différentes études de chute de particule dans un fluide complexe font intervenir en plus du nombre de Reynolds, le nombre de Bingham :

$$Bn = \frac{\tau_0 D}{\eta_{pl} v} \quad (I-19)$$

Toutefois, ces modèles ne permettent pas de rendre compte du caractère thixotrope des matériaux cimentaires, comportement qui peut être défini comme étant une évolution des propriétés rhéologiques et plus particulièrement une évolution de la viscosité dans le temps. Ainsi, [Ferroir et al. 2004] proposent un modèle permettant de prendre en compte la thixotropie des matériaux cimentaires, et de son influence sur la chute de sphère.

A partir d'un état de structuration du matériau (caractérisé par le paramètre λ), ils définissent les équations (II.10) et (II.11) :

$$\mu = \eta_0 (1 + \lambda^n) \quad (I-20)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{\theta} - \alpha \dot{\gamma} \lambda \quad (I-21)$$

Où n ; est une constante ≥ 1 ,

η_0 ; est la valeur limite de la viscosité correspondant à une déstructuration complète du matériau,

$\lambda \rightarrow 0$, θ ; est le temps caractéristique de l'évolution de la microstructure,

α ; est une constante dépendant du système.

Lorsque la particule est en mouvement, une partie du fluide est sollicitée. D'après [Atapattu, 1995], la première visualisation de l'écoulement faite par Bulina (1967), suggérait l'existence de régions apparemment non déformées (ou stagnantes) liées à l'objet se déplaçant dans le milieu viscoplastique. [Beris et al. 1985] ont prédit numériquement l'allure de la zone entourant une sphère en mouvement dans un fluide comme présenté sur la figure I.8.

D'après [Chhabra, 1993], les parois du récipient contenant le fluide peuvent avoir une influence sur la chute de la sphère lorsqu'elles interfèrent avec la zone cisailée.

D'après [Briscoe et al. 1992], la vitesse de chute serait ralentie lorsque les parois sont proches.

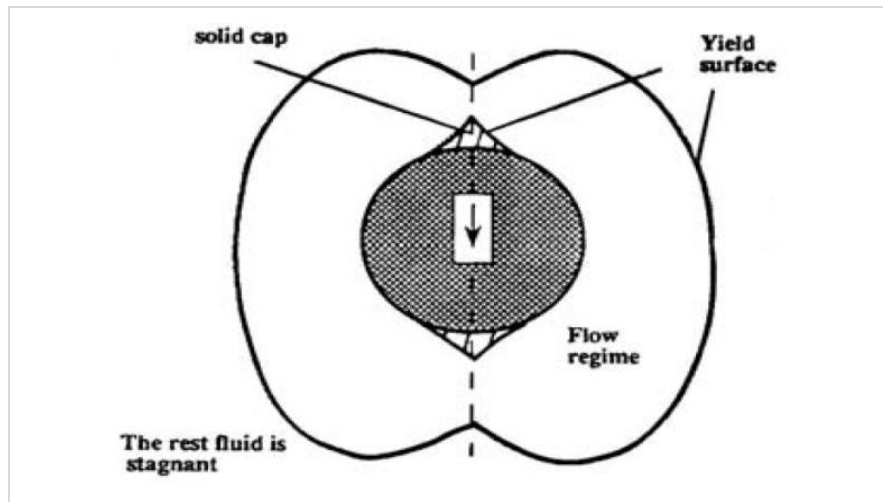


Figure I.8- Champ d'écoulement autour d'une sphère immergée dans un fluide à seuil [Saak et al. 2001]

I.3.1.3- Cas de plusieurs particules sphériques

L'étude du comportement de plusieurs sphères immergées dans un fluide à seuil a fait l'objet de quelques publications, principalement issues du domaine numérique. [Sidky et al.1981] ont montré que les frottements inter-granulaires influencent la vitesse de chute des granulats (ségrégation) par la relation suivante : $v' = kv$

Avec v' : vitesse réelle de chute, v : vitesse de chute sans interaction entre les granulats, et k : coefficient de vitesse dépendant de la concentration en granulats à un moment donné (Γ) et ne dépendant pas de la concentration initiale (Γ_0).

Certains auteurs, tels que [Wallevik, 2003], [Powers, 1968] et [de Larrard, 1998] mentionnent également l'existence d'un phénomène d'interaction entre granulats modifiant le comportement de chacune des particules, sans apporter d'éléments de réponse. Indépendamment du fait que le seuil d'écoulement est une caractéristique essentielle, on peut imaginer que le réseau granulaire a lui-même une influence sur la stabilité des BAP. Or aucunes des différentes études ne traitaient de la stabilité ou de l'initiation de la ségrégation du groupe de particules.

I.4 - Fluidité des bétons.

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant.

I.4.1- Caractérisation empirique

L'essai de référence est l'essai au cône d'Abrams [AFGC, 2002]. Traditionnellement, cet essai, est utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et de définir son caractère plus ou moins plastique (norme NF EN 206). L'affaissement des BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée.

Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

L'essai d'étalement au cône d'Abrams est simple à réaliser et ne demande qu'une faible quantité de matériau (six litre) (figure I.9). Il peut donc être utilisé aussi bien en laboratoire que sur site.

Selon [AFGC, 2002], les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm.

Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- Classe SF1: étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2: étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3: étalement compris entre 760 et 850 mm



Figure I.9- Essai d'étalement au cône d'Abrams

Le résultat d'un essai empirique seul n'est pas suffisant pour décrire convenablement le comportement du béton. Quelques exemples montrent que deux mélanges de béton ayant une même valeur d'affaissement peuvent avoir un comportement différent lors de l'écoulement [Ferraris, 1999], [Khayat, 1999(a)]. Les caractéristiques intrinsèques des matériaux doivent donc être déterminées.

I.4.2- Mesures rhéologiques.

Les mesures réalisées sur bétons, [NIST, 2001], [Wallevik, 2003] 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.

[Ferraris, 1999], déclare que les mesures rhéologiques sont délicates à réaliser dans le cas des bétons, du fait de l'étendue des tailles des particules qui les composent

(de 1 μm à 15 mm voire 20). En effet, les appareils généralement utilisés par les rhéologues servent à caractériser des gels modèles, le sang ou divers fluides composés de particules nanométriques. Ils ne sont pas adaptés aux mesures sur béton du fait de la taille d'un échantillon représentatif. Différents rhéomètres à béton ont été mis au point mais ils sont difficilement comparables entre eux car leurs modes de mesure et leurs géométries sont variables. L'utilisation d'un matériau modèle de référence permettrait de calibrer ces rhéomètres, mais à l'heure actuelle on ne dispose pas de matériau de ce type pour simuler le comportement des bétons [NIST, 2001].

Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons, dont une revue est proposée par [Ferraris, 1999]. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley représentés sur la figure I.10.

$$\text{Modèle de Bingham:} \quad \tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (\text{I.22})$$

$$\text{Modèle de Herschel -Bulkley : } \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.23})$$

$n < 1 \rightarrow$ fluide rhéo-fluidifiant.

$n = 1 \rightarrow$ fluide de Bingham.

$n > 1 \rightarrow$ fluide rhéo-épaississant.

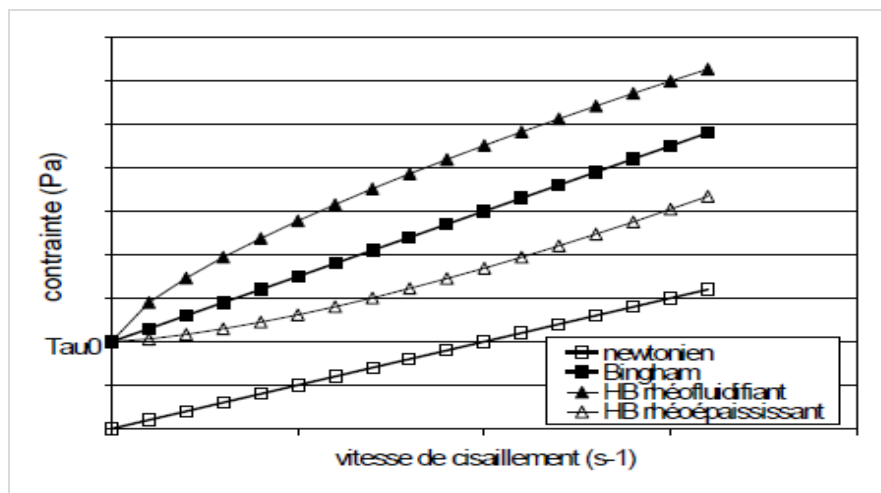


Figure I.10- Modèles rhéologiques

Avec τ_0 , Seuil d'écoulement,
 η_{pl} , Viscosité plastique,
 K , Coefficient de viscosité,
 n , Indice.

De Larrard, Ferraris et Sedran [de Larrard et al ,1998] ont montré que les paramètres K et n du modèle de Herschel-Bulkley étaient liés, donc que ce modèle ne contenait en

fait que deux paramètres indépendants. Ils proposent un modèle de Bingham «modifié», issu de l'exploitation des mesures rhéologiques selon le modèle de Herschel-Bulkley. La valeur du seuil d'écoulement obtenue avec le modèle de Herschel-Bulkley est conservée, mais la courbe d'écoulement est remplacée par une droite obtenue par régression linéaire. Un exemple de résultats obtenus par cette méthode est présenté sur la figure I.11.

La réalisation de mesures rhéologiques sur béton est difficile et la prise en compte d'un grand nombre de paramètres est indispensable pour obtenir une interprétation du comportement du béton la plus réaliste possible. De plus, les mesures dépendent du protocole de cisaillement : taux de cisaillement, température, énergie de malaxage, etc. [Ferraris et al, 1998]. Les rhéomètres doivent, par ailleurs, répondre à différents critères (notamment les dimensions du bol) et certains rhéomètres présentés ci-dessus ne semblent pas être parfaitement adaptés [NIST, 2001], [Sedran, 1999].

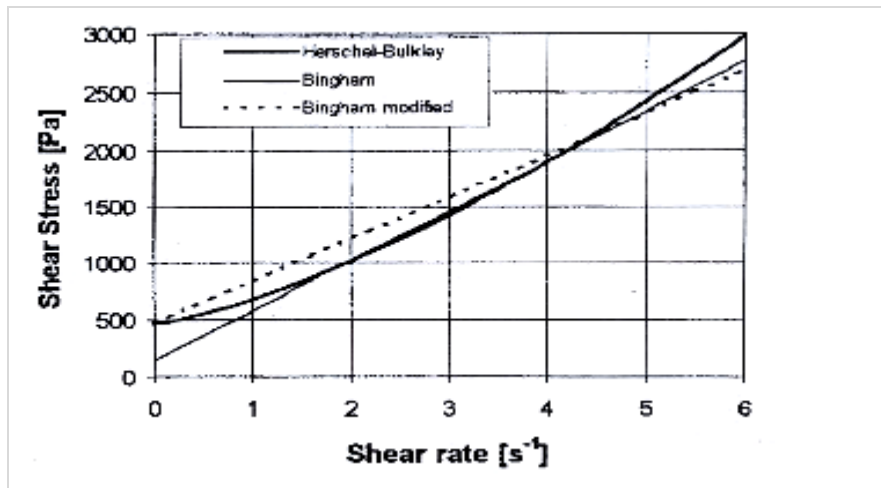


Figure I.11. Modèle de Bingham modifié [de Larrard et al ,1998]

Cependant quelle que soit l'approche employée (empirique ou physique) les propriétés des BAP se différencient notablement des celles des bétons traditionnels. D'une part, l'affaissement n'est plus mesurable puisqu'il est total, on parle donc d'étalement des BAP.

D'autre part, malgré le fait que la réalisation d'essais rhéologiques est difficile, et que le choix d'un modèle adapté est encore discuté, les différentes données indiquent que la valeur du seuil d'écoulement des BAP est bien plus faible que celui des autres bétons [Wallevik, 2003], [Sedran, 1999]. Les caractéristiques rhéologiques étant mobilisées lors des essais d'étalement ou d'écoulement, nous allons maintenant nous intéresser aux relations existant entre les approches empiriques et physiques.

I.4.3- Corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques

Une relation semble pourtant exister entre le seuil d'écoulement et l'étalement d'un BAP.

Kurokawa, d'après [Jin, 2002], et Sedran [Sedran, 1999] ont d'ailleurs proposé des expressions permettant d'estimer le seuil d'écoulement (τ_0) d'un BAP à partir de la mesure d'étalement (D) au cône d'Abrams.

Kurokawa obtiendrait la relation,

$$\tau_0 = \frac{\rho g V_{\text{cône}}}{25\sqrt{3}\pi D} \cdot 10^8 \quad (\text{I.24})$$

ρ ; la masse volumique du béton, g ; accélération de la pesanteur et $V_{\text{cône}}$; volume du cône d'Abrams.

Sedran, [Sedran, 1999] propose, à partir du lissage linéaire de ses résultats expérimentaux présentés sur la figure I.12, l'équation suivante :

$$\tau_0 = (808 - D) \rho / 1174 \quad (\text{I.25})$$

Avec ; ρ , la masse volumique du béton et

τ_0 , seuil mesuré au BTRHEOM (*Rhéomètre développé pour les bétons*).

Les cercles correspondent à des bétons saturés en adjuvant et contenant un retardateur de prise, les triangles correspondent à des bétons contenant du filler calcaire et du super plastifiant [Wallevik, 2003].

Jin [Jin, 2002] a comparé ses propres résultats expérimentaux avec les expressions de Kurokawa et de Sedran.

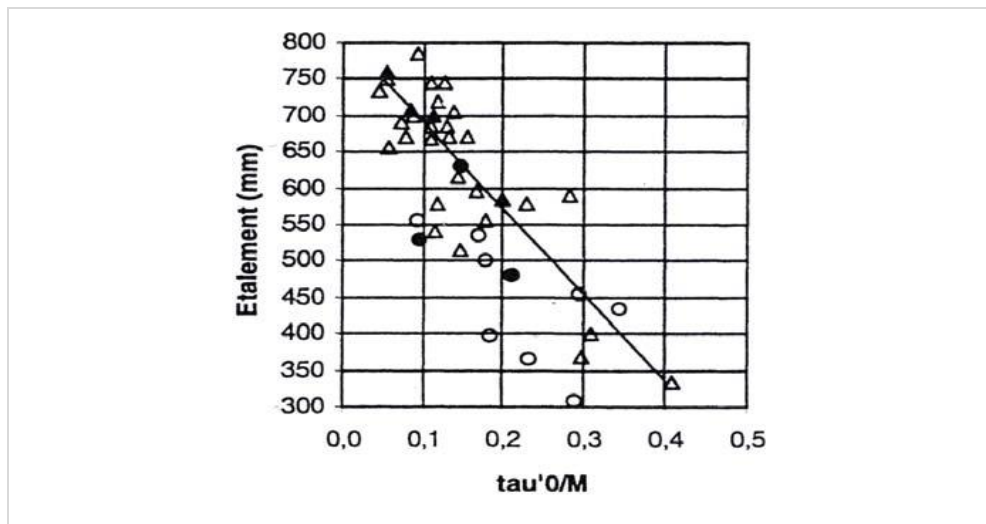


Figure I.12- Relation entre l'étalement et le seuil d'écoulement rapporté à la masse volumique (notée M) [Wallevik, 2003].

Les seuils de cisaillement étant mesurés avec un autre type rhéomètre « Two-point test », il a repris les relations obtenues par le NIST [NIST, 2001], pour pouvoir caler l'expression de Sedran définie pour un seuil d'écoulement mesuré au BTRHEOM. Il obtient alors une nouvelle expression, en remplaçant le terme τ_0 de l'équation de Sedran par,

$$\tau_{0 (two-point)} = 0.54\tau_{0 (BTRHEOM)} - 153.9$$

Cette expression qu'il nomme « équation de Sedran modifiée » est alors plus proche de ses résultats expérimentaux (figure I.13).

Les différentes études issues de la littérature montrent que la relation entre le seuil d'écoulement d'un BAP et son étalement, même si elle existe, semble difficilement quantifiable. Ceci pourrait s'expliquer par la différence entre les modes de mesures, un manque de sensibilité des appareils utilisés, ou encore par la difficulté de modéliser le comportement du matériau.

Dans le cas des bétons traditionnels, la relation affaissement-seuil d'écoulement a clairement pu être mise en évidence [Hu, 1995], [de Larrard et al ,1998] et [Sedran, 1999] mais pour ces bétons, les valeurs de seuil sont bien plus élevées donc moins proches de la précision des appareils.

L'existence d'une telle relation a également été mise en évidence dans le cas des mortiers et des pâtes de ciment [Jin, 2002] et [Emborg, 1999]. Notons que pour ces matériaux, les rhéomètres et/ou les géométries utilisées pour les mesures ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour les bétons.

Afin de mieux appréhender les propriétés des bétons, les mécanismes conférant au matériau sa fluidité sont présentés dans le paragraphe suivant.

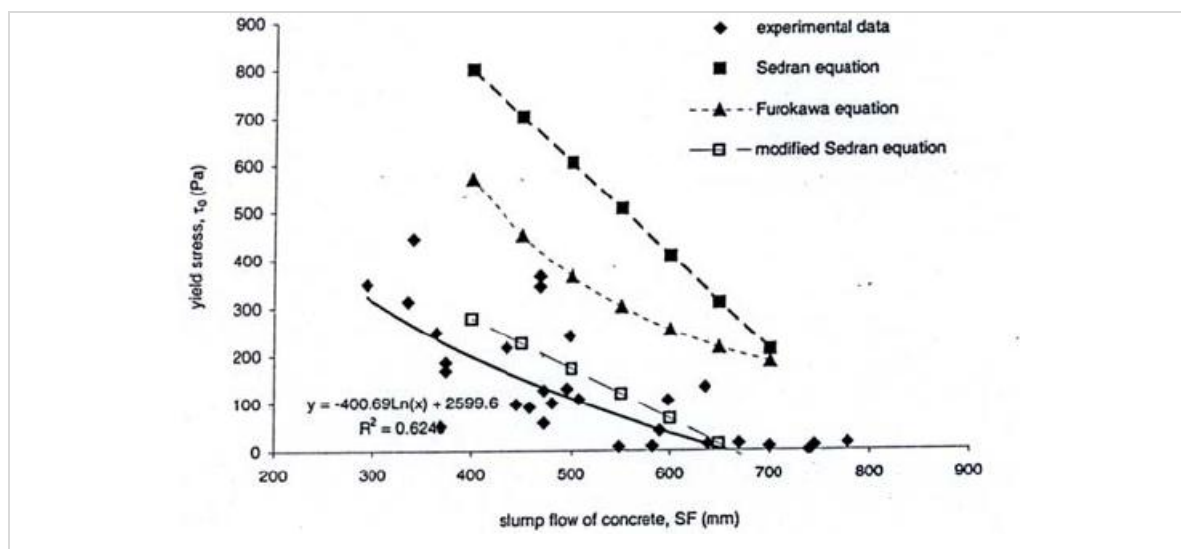


Figure I.13- Comparaison entre des points expérimentaux et différentes expressions permettant de déterminer le seuil d'écoulement à partir de l'étalement [Jin, 2002]

I.4.4- Mécanismes générant la fluidité

I.4.4.1- Théorie de l'excès de pâte

Vers 1940, Kennedy a proposé, une théorie permettant de comprendre l'origine de l'ouvrabilité d'un béton, d'après [Powers, 1968]. En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité de pâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité (figure I-14).

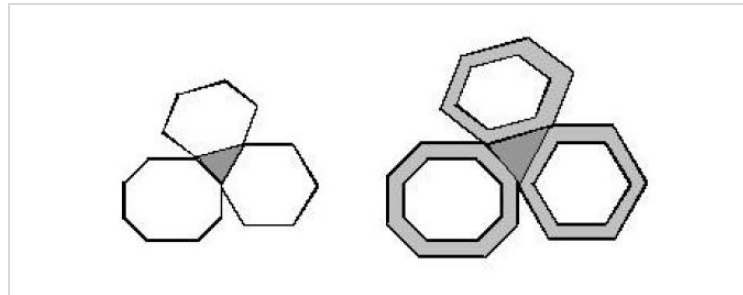


Figure I.14- Dispersion des granulats par excès de pâte.

L'Association française de Génie Civil [AFGC, 2002] ne donne pas de recommandations particulières sur, l'influence de la forme des granulats sur la fluidité, et déclare que des granulats roulés ou concassés peuvent être utilisés dans les bétons. Il est généralement admis que les granulats ronds confèrent au béton une plus grande ouvrabilité.

Certains auteurs ont effectivement mis en évidence l'existence d'une relation entre la quantité de pâte de ciment et l'étalement du béton [Su et Miao, 2003], [Yen et al, 1999] (figure I.15).

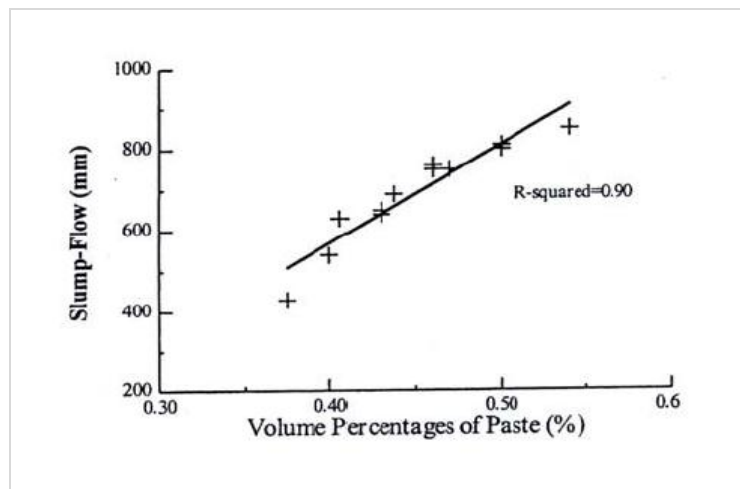


Figure I.15 - Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton. [Yen et al, 1999].

Cette relation ne concerne pas seulement les plus gros granulats et se retrouve à l'échelle des grains de sable. Ouchi et al. [Ouchi et al, 1999] considèrent en effet que lorsque le béton se déforme, le mortier se déforme également sous l'effet du rapprochement des granulats. D'après eux, la résistance au cisaillement du mortier augmenterait en fonction de l'effort normal engendré par ce rapprochement et serait dépendante de la quantité de particules fines contenues dans le mortier (figure I.16-a). En d'autres termes, moins il y a de frottements entre les grains de sable, plus le mortier s'écoule facilement et donc plus le béton lui-même s'écoule facilement (figure I.16-b).

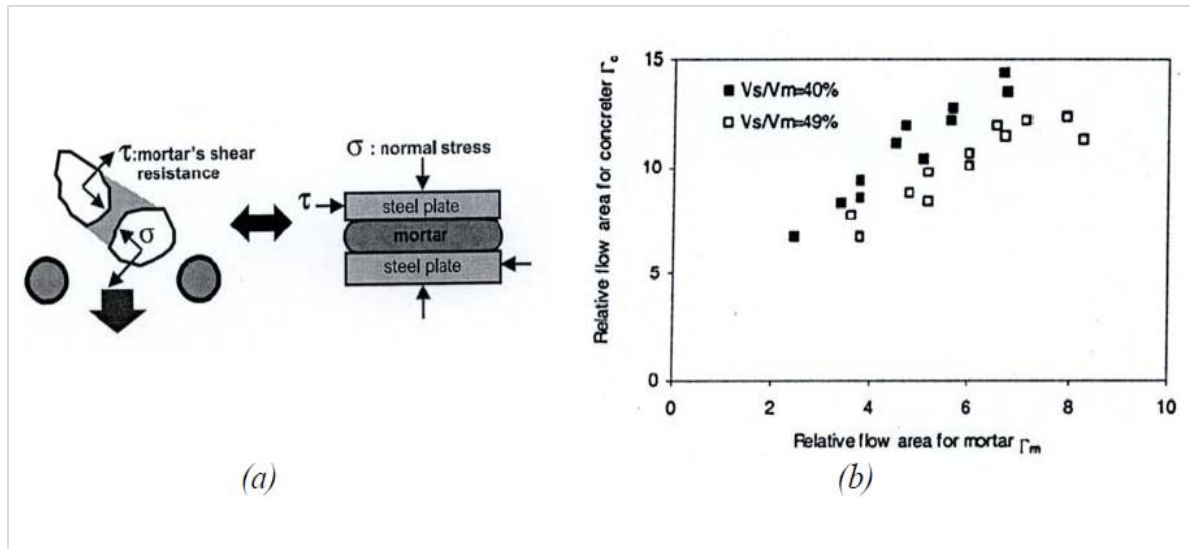


Figure I.16 - (a) Mécanisme de déformation du mortier sous l'action du rapprochement des granulats, (b) Comparaison entre l'étalement du béton et celui du mortier en fonction de la fraction volumique de sable contenue dans le mortier.

[Yen et al. 1999] mettent en évidence un phénomène similaire. Pour un même dosage en gros granulat (pour un rapport eau sur liant (E/l) et un dosage en super plastifiant constants) plus la quantité de sable est faible, plus l'étalement du béton est important.

Or certains auteurs ont montré que l'étalement n'est pas uniquement lié à la quantité de pâte.

En effet, [Pedersen et Smeplass, 2003] ainsi que [Van Bui et al. 2002] ont mis en évidence le fait que plus, le seuil de la matrice, est faible et moins il faut de pâte pour obtenir un étalement donné (figure I-17). Ainsi l'étalement d'un BAP est non seulement dépendant de la quantité de pâte qui permet de réduire les frottements entre les granulats (sable et gravillons) mais également de la fluidité de la pâte. Or la fluidité de la pâte est elle-même liée à des frottements inter granulaires.

D'après [de Larrard, 1996], le seuil d'écoulement ne serait pas gouverné par la phase liquide, dont le rôle n'est que de définir un espace moyen entre les particules, mais il serait dépendant du nombre et de la nature des contacts entre particules. Il propose une

interprétation physique du modèle de Bingham (cf. figure I.11) proposée par Ferraris, cité dans [Ferraris, 1999], en supposant que le béton est un mélange granulaire suspendu dans l'eau, donc que tous les grains (granulats, sable, ciment) appartiennent à la phase solide.

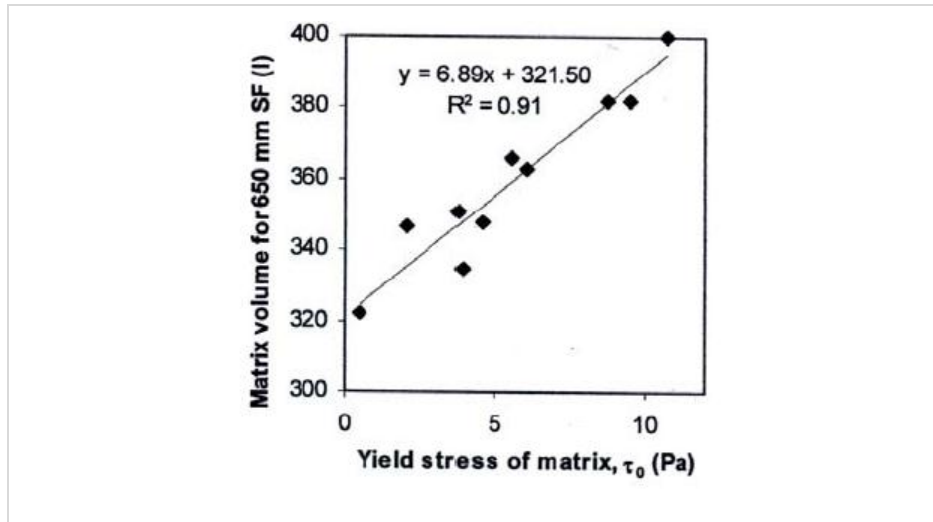


Figure I.17- Relation entre le seuil d'écoulement de la matrice cimentaire et la quantité de pâte requise pour obtenir un étalement de 650 mm [Pedersen et Smeplass, 2003].

Le terme de seuil, τ_0 , apparaît comme étant la contribution de la phase solide et le terme $\eta_{pl} \dot{\gamma}$ comme celle de la phase liquide. L'auteur précise cependant que le degré de défloculation peut varier avec la vitesse de cisaillement et modifier la circulation du fluide. La viscosité est donc dépendante du gradient de vitesse ce qui explique que le comportement généralement observé est non linéaire donc plus proche du modèle de Herschel-Bulkley.

De plus, les travaux de [Mansoutre, 2000], portant sur la caractérisation de pâtes de C3S, montrent que la contribution de la phase solide au seuil d'écoulement est liée à deux phénomènes, mis en évidence en fonction de la concentration volumique sur la figure I.18.

Le seuil d'écoulement provient :

- d'une contribution essentiellement physico-chimique τ_{int} liée aux forces de surface entre les grains lorsque la fraction volumique est inférieure à 38%.
- à laquelle s'ajoute une contribution granulaire τ_{fr} prenant en compte les forces de frottements entre les grains lorsque la fraction volumique augmente.

Les différents auteurs [de Larrard, 1996], [Sedran, 1999], [Mansoutre, 2000], [Toutou, 2002] décrivent donc le seuil d'écoulement comme étant la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton. Donc s'il existe une relation entre le seuil d'écoulement et les frottements intergranulaires, il existe une relation entre le seuil et la quantité de fluide suspendant

puisque les frottements dépendent de la quantité de pâte. Or nous avons vu que l'étalement dépend également de la quantité de pâte. Il existe donc bien une relation entre l'étalement d'un BAP et son seuil d'écoulement.

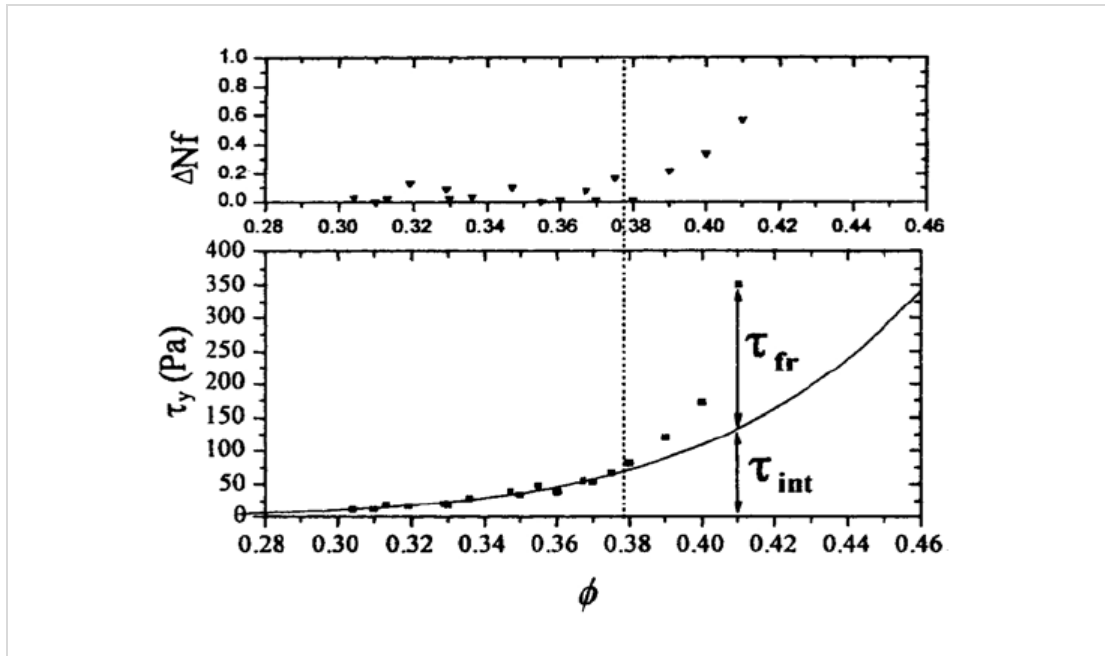


Figure I.18- Evolution du seuil d'écoulement et du saut de force normale en fonction de la fraction volumique de pâtes de C3S [Mansoutre, 2000]

Les études précédentes montrent qu'à différentes échelles (pâte de ciment, mortier), il existe une relation entre le seuil d'écoulement et l'étalement et que les frottements inter- granulaires jouent un rôle essentiel dans les mécanismes mis en jeu. La question qui se pose alors est de savoir si les études sur pâte ou sur mortier peuvent servir à prédire le comportement du béton.

La réalisation d'essais sur pâte de ciment ou sur mortier présente en effet de nombreux intérêts, et notamment ceux de réduire la quantité de matériau à tester, la main d'œuvre et le temps nécessaire pour le caractériser.

I.4.4.2- La phase fluide d'un béton.

On peut se dire quelle est la phase fluide participant à la mobilité du béton. Le béton est généralement considéré comme un mélange bi-phasique, constitué d'une phase granulaire et d'une phase fluide.

Mais, il subsiste un problème de distinction entre les phases, laquelle est généralement effectuée sur des considérations granulométriques (la séparation s'établissant aux alentours de 80 μm) ou sur l'évolution pendant la prise (qui n'affecte en principe que la pâte), comme l'évoque [de Larrard, 1996].

La prédiction du comportement d'un béton à partir des propriétés de sa pâte de ciment semble difficile. En effet, [Nehdi et al ,2004] et [Ferraris, et al, 1992] ont montré que le comportement rhéologique apparent, mais surtout la valeur du seuil d'écoulement d'une pâte de ciment dépendait de la distance entre les plateaux d'un rhéomètre simulant la distance entre les granulats. Plus les plateaux sont rapprochés, plus la valeur du seuil est élevée. Donc pour prédire le comportement d'un béton à partir de sa pâte de ciment, il faut caractériser la pâte dans les conditions auxquelles elle serait soumise en présence de granulats. Il s'agit donc d'estimer la distance entre les granulats dans un béton, ce qui ne semble pas facilement réalisable. [Van Bui et Montgomery, 1999] ont proposé un calcul fonction du volume de pâte et du diamètre moyen des granulats (ensemble sable et gravillons). Ils obtiennent des distances entre granulats comprises entre 0,3 et 0,4 mm. D'après [Ferraris, et al, 1992], la distance de séparation serait de l'ordre de 0,2 mm. Par ailleurs, le sable contient une certaine quantité de fines. Le comportement d'une pâte de ciment et le comportement de la phase suspendante d'un mortier (pâte de ciment et fines du sable) ont de fortes chances d'être différents. Ainsi, pour formuler les bétons à hautes performances par la méthode des coulis de l'AFREM [De Larrard et al, 1996] tous les éléments inférieurs à 2 mm sont pris en compte.

Une étude préliminaire sur pâte peut donc être intéressante pour choisir des constituants et éventuellement appréhender leurs interactions, mais elle ne permettra pas de prédire complètement le comportement du béton car le rôle des grains de sable ne peut être négligé. Une approche sur mortier semble alors plus rationnelle.

Jin [Jin, 2002] a comparé les comportements de BAP et ceux des mortiers directement issus de leur composition, c'est-à-dire formulés en n'enlevant que les gros granulats (5/20 mm). Il obtient une bonne corrélation entre les mesures d'étalements respectifs (figure I.19-a). De même, l'étalement et le seuil d'écoulement du mortier sont bien corrélés (figure I.19- b).

Cette différence de comportement entre un béton et le mortier qui le compose peut s'expliquer comme dans le cas des pâtes de ciment par le fait que les gros granulats ont une influence sur la réponse rhéologique du matériau et que les gros granulats contiennent une certaine quantité de fines. Un mortier étudié seul et le mortier d'un béton n'ont probablement pas le même comportement.

Selon un projet français Calibé [PNC, 2001], La technique du Mortier de Béton Equivalent (MBE) apparaît, comme, une alternative particulièrement intéressante. Le principe est de considérer qu'il existe une corrélation simple entre les propriétés rhéologiques du béton et celles du mortier qui le compose (figure I.20). Mais le mortier jouant un rôle sur la rhéologie du béton n'est pas directement déduit de la

formule de béton. En effet, dans un béton, une partie de la pâte et des grains de sable adhèrent aux gravillons et ne participent donc pas à la rhéologie.

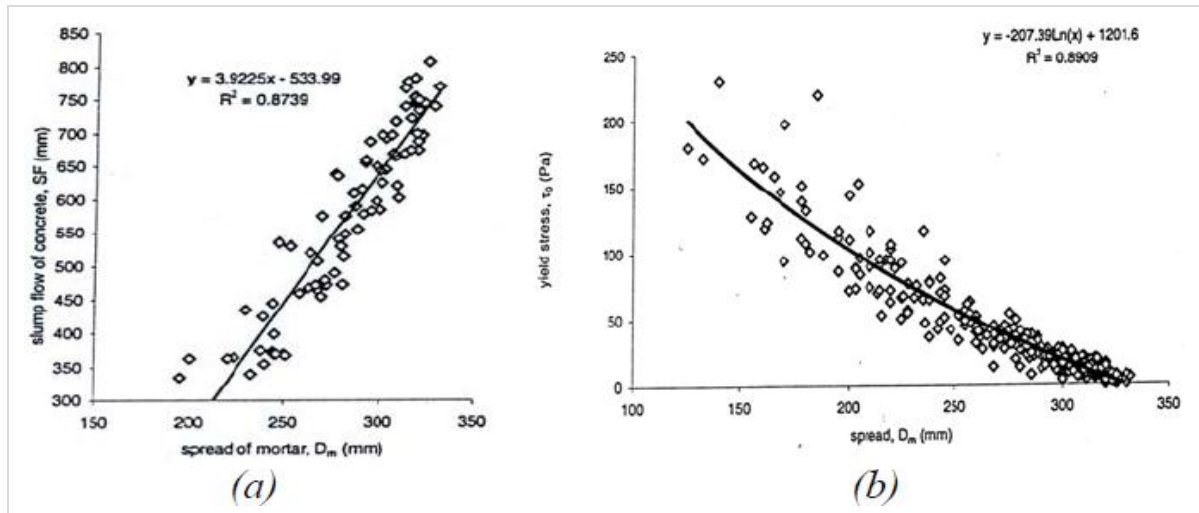


Figure I.19- (a) Corrélation entre l'étalement d'un béton et celui de son mortier.
(b) corrélation entre l'étalement du béton et le seuil d'écoulement de son mortier.

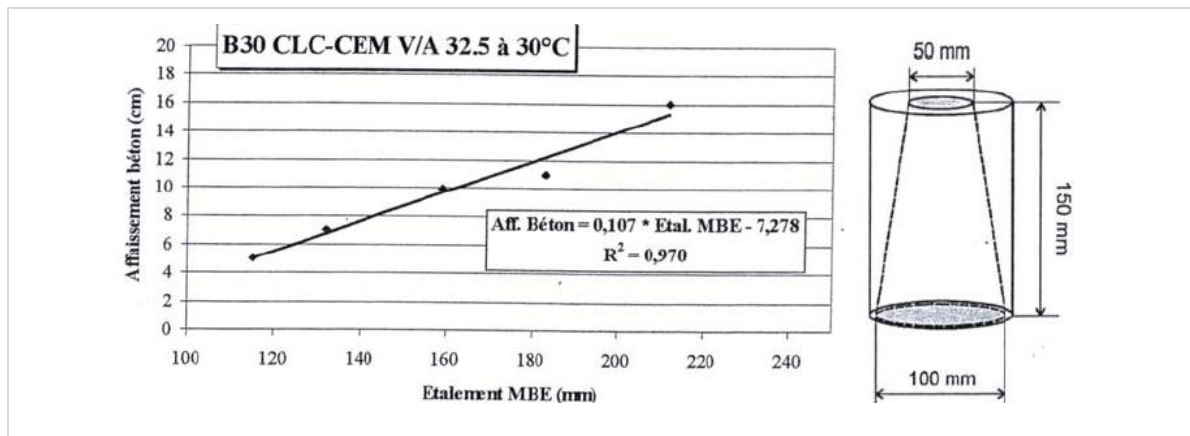


Figure I.20- Corrélation entre l'étalement d'un MBE et l'affaissement du béton et dimensions du cône MBE, homothétique du cône d'Abrams [PNC, 2001]

Le MBE correspond à la partie du mortier participant à la rhéologie. Il est équivalent au mortier qui serait obtenu en tamisant le béton frais au tamis de 5 mm. La composition du MBE, conduisant aux mêmes propriétés que celles du mortier tamisé, est déduite de celle du mortier du béton en corrigeant la quantité de sable afin que la surface granulaire du MBE soit la même que celle du béton. Il reste certaines limites d'emploi pour lesquelles la méthode n'est plus valable ou pour lesquelles des études sont à poursuivre, notamment pour des bétons ayant un affaissement supérieur à 25 mm, ou pour des gravillons présentant une teneur en fines élevée [PNC, 2001]. La question de l'existence d'une méthode permettant de prédire le comportement d'un béton à partir d'une pâte de ciment ou d'un mortier ne semble donc pas totalement résolue. Le principal problème étant que la granulométrie d'un béton est généralement

continue et donc que la distinction entre les phases n'est pas simple. Par ailleurs, la contribution des grains de plus grosse taille que les grains de la phase suspendante ne peut être négligée.

I.5 - La ségrégation des bétons.

I.5.1- Problème de la ségrégation

Le problème de la ségrégation se rencontre dès que l'on manipule des mélanges de grains de propriétés différentes. A la différence des liquides qu'il est souvent facile de mélanger, un mélange homogène de grains est difficile à obtenir dès qu'il existe des différences de tailles, de masses, de propriétés mécaniques (friction . . .). Parmi les différents mécanismes empêchant un bon mélange, la ségrégation due à la différence de taille est de loin le plus efficace. Nous présentons ici quelques configurations donnant lieu à de la ségrégation et qui ont été très étudiées.

I.5.2 - Ségrégation sous vibrations.

Lorsque l'on fait vibrer un milieu granulaire poly-disperse, les gros grains se retrouvent souvent à la surface libre. La ségrégation par vibrations a donné lieu à de nombreuses expériences qui ont exhibé l'existence de plusieurs mécanismes pouvant expliquer la remontée des grosses particules.

I.5.3 - Ségrégation en écoulement

Considérons un mélange homogène de gros et petits grains que l'on fait s'écouler sur un plan incliné rugueux. Très rapidement le long de la pente, les gros grains remontent à la surface libre. Le mécanisme est assez simple, Lors de l'écoulement les grains bougent continuellement les uns par rapport aux autres et des trous se forment entre eux dans lesquels des particules de la couche du dessus peuvent tomber. Les gros grains ne peuvent tomber que dans les gros trous, tandis que les petits grains peuvent tomber dans les petits et gros trous. Cette asymétrie dans les mouvements fluctuants d'échanges de couches donne lieu à la ségrégation, Figure I.21.



Figure I.21- Figures de digitation observées au front d'un écoulement contenant des grosses particules.

I.5.4 - Ségrégabilité

Pour limiter autant que possible la ségrégation des granulats, des exigences strictes sur la formulation du béton sont à respecter :

- le seuil de cisaillement et la viscosité de la phase suspendante doivent être suffisamment élevés pour contrecarrer les forces liées à la sédimentation [Miura *et al.* 1993]. La densité d'une pâte de ciment sera toujours plus faible que celle des granulats, ce qui d'après le principe d'Archimède ne peut assurer l'équilibre des plus gros grains dans une suspension de ciment si les dissipations visqueuses de la matrice ne sont pas suffisantes pour ralentir leur chute. [Umehara *et al.* 1994] montrent en effet qu'une diminution progressive de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation ;
- le squelette granulaire doit avoir une étendue granulaire poly disperse afin de mieux jouer l'effet d'échelle qui serait obtenu par un mélange stable de petites et moyennes tailles de particules, entre 63 μm et 2 mm) limitant la chute des plus gros gravillons ;
- la concentration en inclusions granulaires doit être relativement faible pour limiter les frottements granulaires et la possibilité de sédimentation [Miura *et al.* 1993]. En effet, les collisions et les frictions inter-granulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats [Ozawa *et al.* 1995].
- le béton doit présenter une bonne thixotropie, qui peut sous certaines conditions limiter la sédimentation ;
- la teneur en eau ajoutée doit suffire uniquement à la maniabilité, et aux éventuels apports dus à la présence des granulats plus ou moins secs.

Un cisaillement peut modifier la stabilité d'un béton, en particulier si le volume de matrice est faible par rapport au volume de granulats. La qualité rhéologique de la matrice cimentaire est aussi un facteur important. La résistance à la ségrégation du béton dépend fortement des propriétés du fluide porteur du béton qu'est la pâte de ciment ou le mortier, suivant l'échelle considérée.

Toute fois, la compacité maximale d'un squelette granulaire ne conduit pas forcément à la ségrégabilité minimale. La ségrégation est minimisée en augmentant les classes intermédiaires au détriment de la plus grossière. Si chaque classe granulaire occupe l'espace inter-granulaire lui conférant sa compacité maximale afin d'obtenir une granularité de l'ensemble la plus continue, le mélange sera plus résistant à la ségrégation par rapport à un mélange de granularité discontinue [de Larrard, 2000]. Une distribution granulaire poly-disperse discontinue sera plus sujette à une ségrégation de taille du fait de l'arrangement des grains les uns par rapport aux autres, subissant des accélérations par gravité, des chocs externes ou de la vibration.

Corollairement à cela, les propriétés géométriques des granulats tels que la forme et l'état de surface jouent aussi un rôle important dans l'écoulement du béton et de la stabilité granulaire.

Une ségrégation importante par séparation de phase dans le béton peut engendrer des variations spatiales tant au niveau mécanique qu'au niveau des variations dimensionnelles du retrait. Ce dernier pouvant provoquer à son tour des fissures qui affaiblissent la durabilité de la structure.

I.6 - La caractérisation de la ségrégation.

I.6.1- Introduction

La stabilité du béton est une caractéristique essentielle puisqu'elle permet de garantir la durabilité de la structure et l'homogénéité des propriétés mécaniques une fois le matériau durci. S'il y a instabilité, c'est à dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de *ségrégation dynamique*. La *ségrégation statique* peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise. La ségrégation n'est pas visible sur les parements sauf si elle s'accompagne de ressuage. Il est donc nécessaire de s'assurer en amont de la stabilité du béton et de disposer d'essais de vérification avant coulage.

Il s'agit de trouver un compromis entre deux caractéristiques qui peuvent sembler contradictoires : fluidité et stabilité.

I.6.2 - Essais de caractérisation de la ségrégation.

I.6.2.1- Ségrégation dynamique

Capacité d'écoulement à travers des armatures plus ou moins denses, différents essais sont disponibles dont on cite ; L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, l'essai à la boîte en L « L-Box », l'essai à la boîte en U (U-Box), J-ring test...

I.6.2.1.1- Essais de caractérisation de l'aptitude au remplissage des bétons

I.6.2.1.1.1- Mesures rhéologiques au cône d'Abrams.

La maniabilité des bétons sera caractérisée de manière traditionnelle par l'affaissement au cône d'Abrams (Figure I.22.). Pour ces bétons, la procédure de remplissage du béton dans le cône se fait par tranches de tiers de volumes du matériau et en piquant jusqu'à 25 coups au total jusqu'à la fin du remplissage pour bien tasser le béton dans le cône. Pour des bétons plus fluides, l'essai au cône fournit une mesure d'étalement. Dans ce cas, le remplissage du cône se fait d'un seul trait. Si les effets d'inertie peuvent être négligés, il est généralement admis que l'écoulement s'arrête lorsque la contrainte dans le béton testé devient inférieure ou égale à la contrainte seuil du béton [Schowalter et Christensen, 1998]. Dans la plupart des utilisations du cône d'Abrams,

la hauteur initiale du cône étant de 30 cm, la mesure de l'affaissement est considérée si après soulèvement du cône l'affaissement est inférieur à 25 cm. Pour des affaissements supérieurs, l'étalement est mesuré (généralement pour les bétons autoplaçants).

Il est admis [Roussel et Coussot, 2006] que dans le cône il existe deux zones d'écoulement : au-dessus d'une certaine hauteur critique, la contrainte de cisaillement reste inférieure à la contrainte seuil et il n'y a pas d'écoulement. En-dessous de la hauteur critique, la contrainte de cisaillement induite par la pression exercée par le poids du béton situé au-dessus, est plus élevée que la contrainte seuil. Dans cette région, le béton s'écoule par couches successives qui s'étalent jusqu'à ce que la contrainte appliquée sur le matériau devienne égale à celle de la contrainte seuil du béton, marquant l'arrêt de l'écoulement. [Murata, 1984] donne une relation, entre la mesure de l'affaissement et le seuil du béton, qui ne dépend pas de la forme géométrique du cône. Plusieurs chercheurs ont tenté de trouver une relation entre l'affaissement et la contrainte seuil par des méthodes empiriques et théoriques [Hu et de Larrard, 1996], [Roussel et Coussot, 2006].

Hu, propose une relation générale de la forme :

$$\tau_0 = (30 - S)/27 \quad (I.26)$$

Où ρ est la masse volumique exprimée en kg/m³, τ_0 en Pa et S en cm. Cette corrélation est valide pour des affaissements entre 5 et 25 cm. Finalement, pour des consistances de bétons fermes, l'affaissement du béton sera corrélé au seuil τ_0 d'après cette expression.

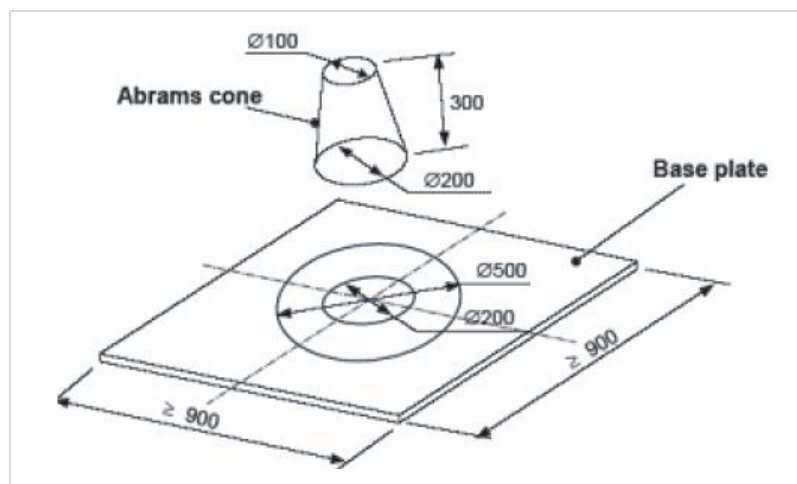


Figure I.22 - Dispositif d'essai de mesure de la fluidité du béton : le cône d'Abrams.

I.6.2.1.2 - Essais de caractérisation de la capacité de passage des bétons.

I.6.2.1.2.1- L'essai à la L-Box.

L'essai de la boîte en L (figure I.23) permet de tester la mobilité d'un béton frais de volume 12 litres, dans un milieu confiné et à travers des armatures d'acier. Ce test permet d'évaluer le taux de blocage du béton lors du passage entre les armatures d'acier (ici 3 barres de diamètres 14 mm utilisées pour les BAP), et d'estimer la capacité de passage et l'aptitude du béton à traverser une zone fortement ferrillée. Recommandé par [AFGC, 2002],

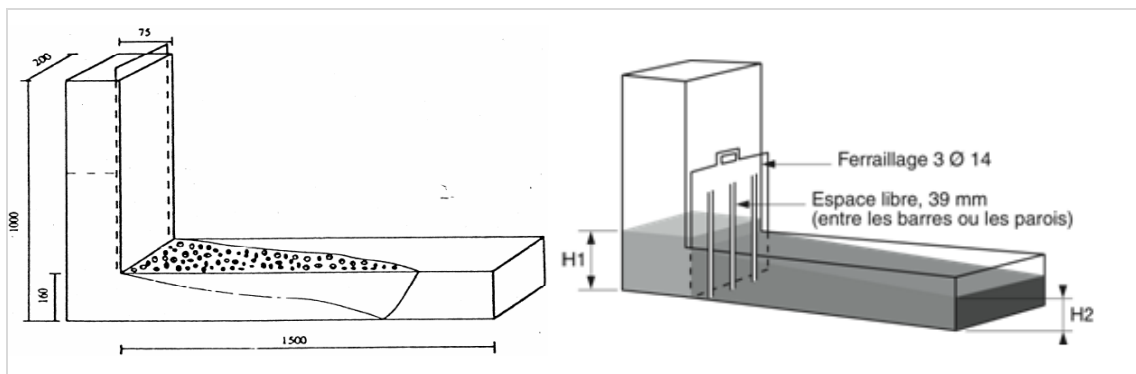


Figure I.23 - Essais d'écoulement à travers des armatures « à la L-Box ».

Dispositif d'essai :

Constitué d'une boîte en forme de L (figure I.23). La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe [AFGC, 2002] recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm.

Mode opératoire de l'essai

1. La partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13l).
2. Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min.
3. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage.
4. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement $H1$ et $H2$).

Le rapport $H2/H1$ permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et une accumulation de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

Toutefois, [Nguyen *et al.* 2006] montrent que l'écoulement dans la boîte est dominé par les effets d'inertie liés à la vitesse de soulèvement de la trappe. Des prédictions

théoriques de la forme du matériau à la fin de l'écoulement ont été corrélées avec succès à des résultats expérimentaux dans le cas de suspensions de fillers calcaires.

I.6.2.1.2.2- L'essai à la boîte en U (U-Box)

Présenté sur la figure I.24, utilisé au Japon et en Angleterre,

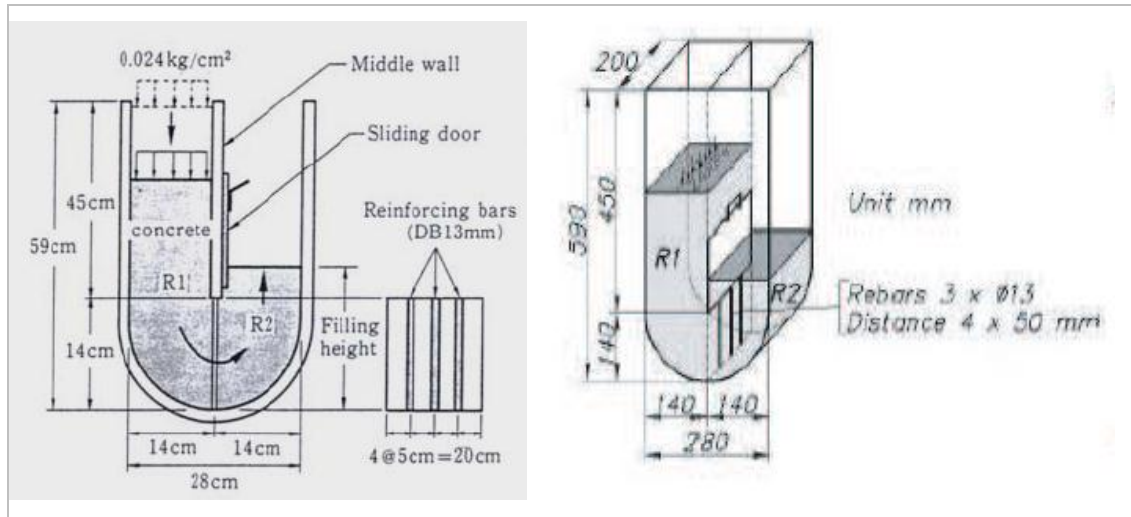


Figure I.24 - Essais d'écoulement à travers des armatures « a la U-Box ».

Le principe de l'essai est sensiblement le même que pour la boîte en *L*. Le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte. Une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise [Jin, 2002].

Différentes versions de la forme de la boîte existent : fond arrondi ou fond aplati.

I.6.2.1.2.3- L'essai J-ring.

Il s'agit d'un anneau sur lequel différentes armatures peuvent être fixées, figure I.25.

Ce matériel est utilisé conjointement avec un essai d'étalement au cône d'Abrams, un essai d'écoulement à l'Orimet-test ou éventuellement un essai au V-funnel.

D'après [EFNARC, 2002], la combinaison de ces essais est intéressante mais on ne sait pas encore comment interpréter les résultats. Par exemple, il est possible de comparer un essai d'étalement seul et un essai combiné : étalement et J-ring. La différence entre les étalements obtenus ne doit pas être supérieure à 50 mm [EFNARC, 2002]. Il est également possible de mesurer la différence entre les hauteurs de matériau obtenues à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Mais cette opération est délicate à réaliser et peu précise.

D'après la [RILEM.TC145], il serait plus intéressant d'utiliser le J-Ring avec l'Orimet-test. En effet, différentes informations seraient recueillies : le temps

d'écoulement à l'Orimet-test que l'on peut relier à la viscosité et l'étalement du béton à travers les armatures indiquant un éventuel blocage.

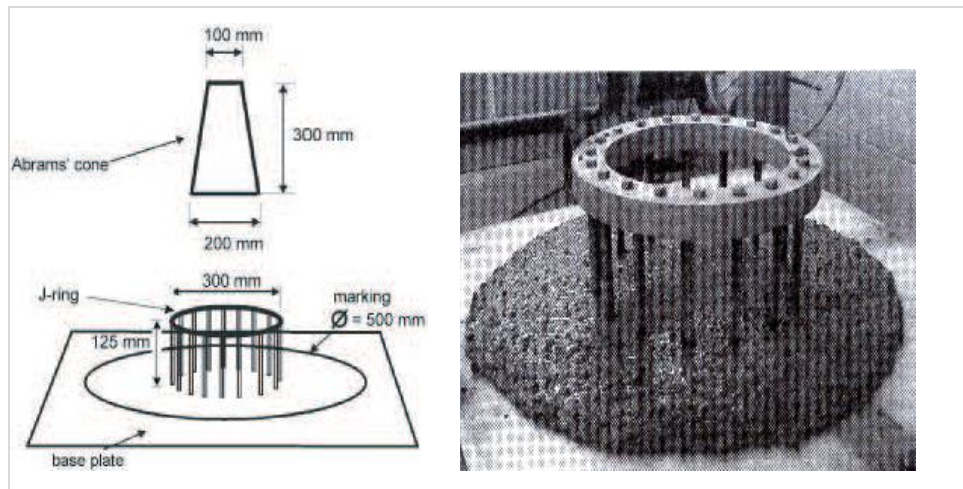


Figure I.25- Essais d'écoulement à travers des armatures « a la J-ring».

Donc la ségrégation dynamique est une séparation entre les granulats et la phase suspendante lors de l'écoulement. Certaines précautions de formulation, telles que la réduction du diamètre maximal des granulats, peuvent permettront de limiter les risques de blocage au droit des armatures. Cette ségrégation dépend principalement de la viscosité du matériau qui permet d'entraîner correctement les granulats lors de l'écoulement. (La viscosité dépendait de la fraction volumique). Or cette caractéristique doit être suffisamment faible pour que le matériau s'écoule avec un débit relativement important.

Une nouvelle contrainte est apparue. Non seulement l'étendue granulaire doit être limitée, mais la granulométrie doit également être continue et bien distribuée. La quantité de sable doit donc être ajustée pour obtenir un compromis satisfaisant.

Cependant, l'absence de ségrégation dynamique lors d'un essai à la L-Box ne suffit pas à garantir l'homogénéité des propriétés finales du matériau. Une instabilité du matériau peut également s'opérer lors de la phase de repos précédant la prise, (ségrégation statique).

I.6.2.2- Ségrégation statique

Si on suppose que le matériau s'est correctement mis en place (absence de ségrégation dynamique) et que seule une ségrégation des gros granulats sous l'effet des forces de pesanteur peut apparaître.

La ségrégation statique est problématique car elle n'est pas décelable en surface (sauf si elle s'accompagne de ressuage). Il est donc nécessaire de l'appréhender en amont du coulage. Les essais permettant de mettre en évidence et de mesurer la ségrégation

statique sur béton frais seront tout d'abord présentés. Des études portant sur la compréhension des mécanismes du phénomène seront ensuite abordées. Nous verrons qu'elles restent limitées mais qu'elles ouvrent cependant quelques pistes de recherche.

Différents essais sont disponibles dont on présente ; Essai au tamis, Essai au cylindre, Essai à la colonne, Essai sur une colonne sans vibration, Essai à la bille, Essai à la palette.

I.6.2.2.1- Essai au tamis

L'essai au tamis complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné (boîte en *L*, en *U*, etc.) ou non (étalement) en caractérisant la stabilité et la résistance à la ségrégation. Proposé dans les recommandations provisoires de [AFGC, 2002], Figure I.26.



Figure I.26- Essai de stabilité au tamis

Mode opératoire de l'essai

Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression :

$$\pi = (P_{\text{laitance}} \times 100) / (P_{\text{échantillon}}) \quad (\text{I.27})$$

Le critère de stabilité de cet essai est:

1. $0 \leq \pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
2. $15 < \pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
3. $\pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise

Lorsque $0 \leq \pi \leq 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise [Cussigh et al, 2003]

I.6.2.2.2- Essai au cylindre

L'essai de ségrégation au cylindre a été proposé par [Van Bui et al.2002]. Il s'agit d'un appareillage assez simple, donc utilisable éventuellement sur chantier, Figure I.27.

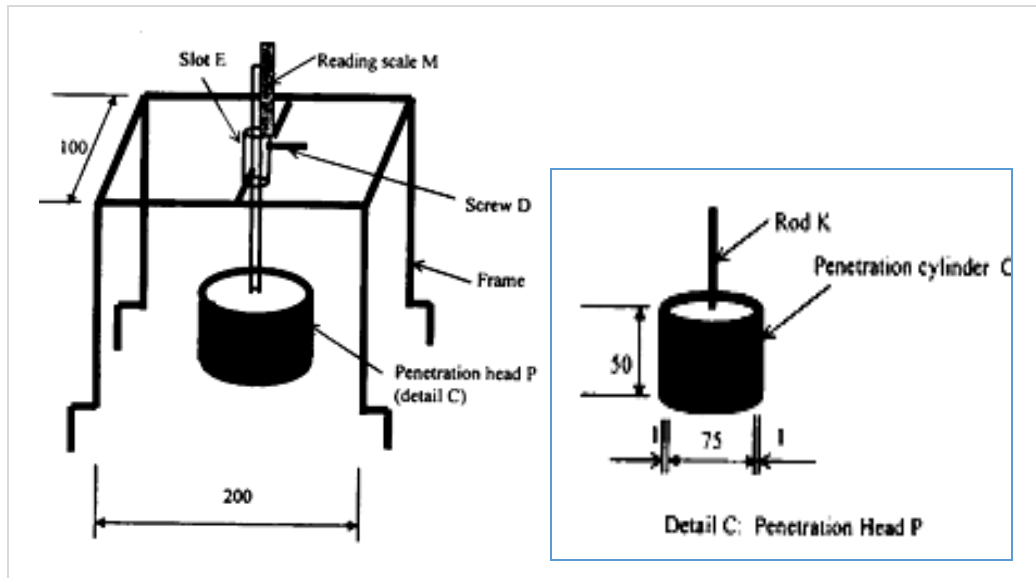


Figure I.27- Essai au cylindre, [Van Bui et al.2002].

L'essai consiste à placer un cylindre (en aluminium ou en plastique) sur la surface de l'échantillon de béton à tester et à le laisser pénétrer dans le matériau. Au bout de 45s la hauteur de pénétration (P_d) est mesurée. Cette manipulation est répétée sur deux côtés diamétralement opposés de l'échantillon.

Le critère de stabilité associé à cet essai est le suivant :

1. si $P_d \leq 8$ mm, alors le béton présente une bonne résistance à la ségrégation
2. si $P_d > 8$ mm, le béton offre une faible résistance à la ségrégation.

Cet essai, présente l'avantage d'être très simple à réaliser et les résultats sont obtenus directement. De plus, l'appareillage est peu cher et peu encombrant. Mais la surface d'essai doit être parfaitement plane. Par ailleurs, il n'y pas données prouvant le caractère répétable et reproductible de cet essai, ni de données concernant la précision de cet essai [RILEM.TC145].

[Sedran, 1999] soulevait la question de la représentativité du cylindre utilisé car il ne disposait pas de ses caractéristiques. Une publication récente de [Van Bui et al.2002] indique que le cylindre pèse 54 g. En prenant une masse volumique de 2700 kg/m³, on peut alors calculer le diamètre du granulat que représente le cylindre.

On obtient : $D \approx 15,7mm$. Cependant, on peut mettre en doute la représentativité de la forme du cylindre utilisé et de son état de surface vis-à-vis d'un granulat réel.

I.6.2.2.3- Essai à la colonne.

Cet essai a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley (en 2002) et par l'Université de Ghent (en 2001), Figure I.28.

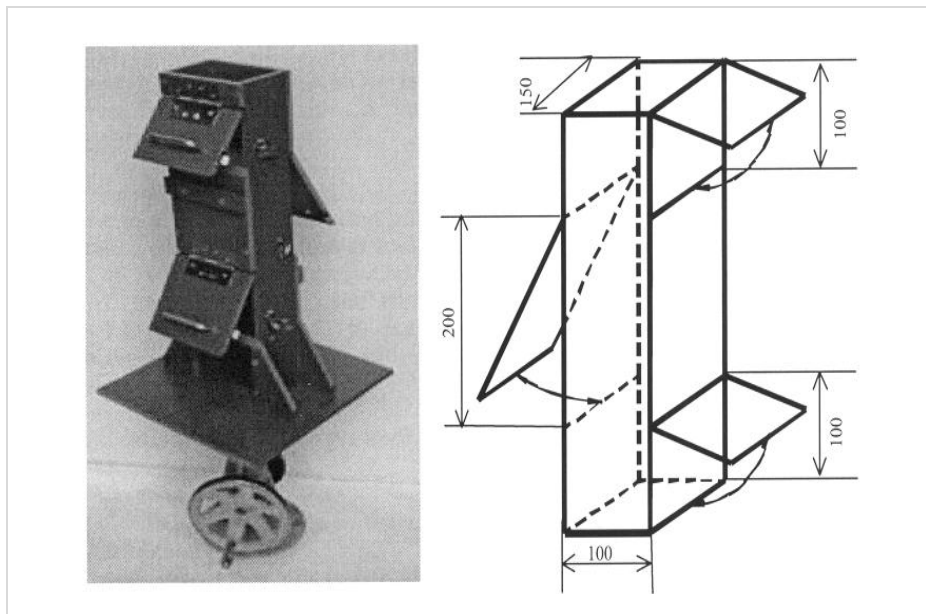


Figure I.28- Essai de stabilité à la colonne [RILEM.TC145]

Il s'agit de remplir la colonne présentée sur figure et de laisser le matériau au repos pendant 1 min. Après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses. Les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés. Chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés.

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

Si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation

Si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps. Il est plus adapté à des essais en laboratoire que sur chantier. Par ailleurs, la répétabilité s'amenuise à mesure que le risque de ségrégation augmente [RILEM.TC145]. On peut s'interroger sur le sens physique de cet essai et de sa pertinence dans le cas des BAP puisque la vibration accélère les phénomènes de ségrégation.

I.6.2.2.4- Essai sur une colonne sans vibration

[Lowke et al. 2003] ont proposé récemment un essai assez proche du principe de l'essai à la colonne décrit plus haut, mais sans vibration. Il s'agit de remplir un cylindre métallique, séparable en trois parties, avec un échantillon de 8l de béton. Après un temps de repos de 30 min (temps beaucoup plus long que celui de l'essai à la colonne), les échantillons provenant des trois parties du dispositif sont récupérés, et pesés. Ils sont ensuite lavés et passés au tamis pour ne conserver que les gravillons supérieurs à 8 mm. La répartition des gravillons 8/16 mm de chacune des parties est étudiée. Comme pour l'essai à la colonne, le principe est simple et assez instinctif mais nécessite un équipement spécifique (tamis et balance). De plus, d'après les auteurs, le temps nécessaire pour réaliser cet essai est de l'ordre de 60 min. Ce dispositif semble donc difficilement utilisable sur chantier sous sa forme actuelle.

I.6.2.2.5- Essai à la bille

Un essai proche de l'essai au cylindre a été développé au LCPC en collaboration avec l'Université de Sherbrooke par [Trudel, 1995] et repris par, [Sedran, 1999], Figure I.29.

Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une bille de même dimension que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton.

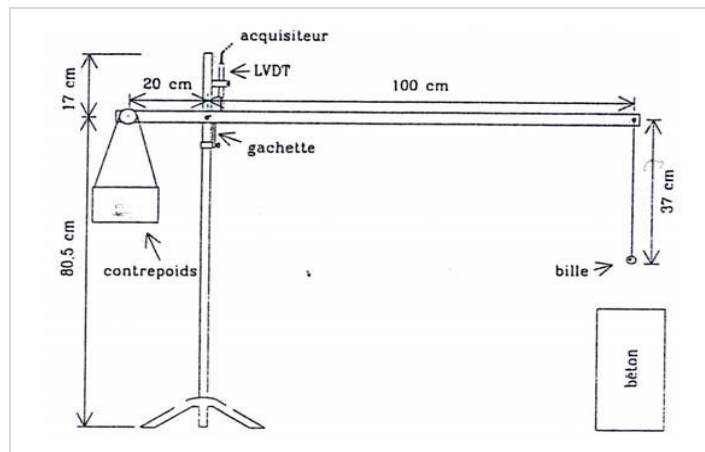


Figure I.29- Essai à la bille, [Trudel, 1995]

La densité apparente de la bille peut être ajustée grâce à un contre-poids et le déplacement de la bille est mesuré par un capteur LVDT relié à un ordinateur. Les résultats sont donc obtenus directement. Le positionnement de la bille avant l'essai est primordial. Trudel [Trudel, 1995] remarque que la bille devrait être positionnée avant le coulage du béton pour ne pas perturber l'arrangement du squelette granulaire, mais ceci ne semble pas possible avec son dispositif expérimental. Il fait donc le choix de positionner la bille par enfoncement sous la surface du béton. Par ailleurs, la densité de

la bille est plus élevée que celle des granulats afin d'accélérer le phénomène de ségrégation. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus sur éprouvettes durcies analysées par un logiciel de traitement d'image permettant de définir un indice de ségrégation. Une bonne corrélation est mise en évidence. Sedran [Sedran, 1999] considère cependant que les paramètres de l'essai doivent être ajustés car le choix d'une densité de bille élevée peut perturber les résultats.

I.6.2.2.6- Essai à la palette

Tangtermsirikul et al. [Tangtermsirikul et al. 1991] ont proposé un essai permettant de qualifier l'aptitude d'un mortier à résister au cisaillement d'un gravillon modèle, représenté dans cet essai par une palette métallique, Figure I.30.

Il s'agit de mesurer l'effort nécessaire pour extraire la palette d'un échantillon de mortier et de répéter la mesure à différentes vitesses. Les auteurs font en effet l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre la vitesse et la force d'extraction.

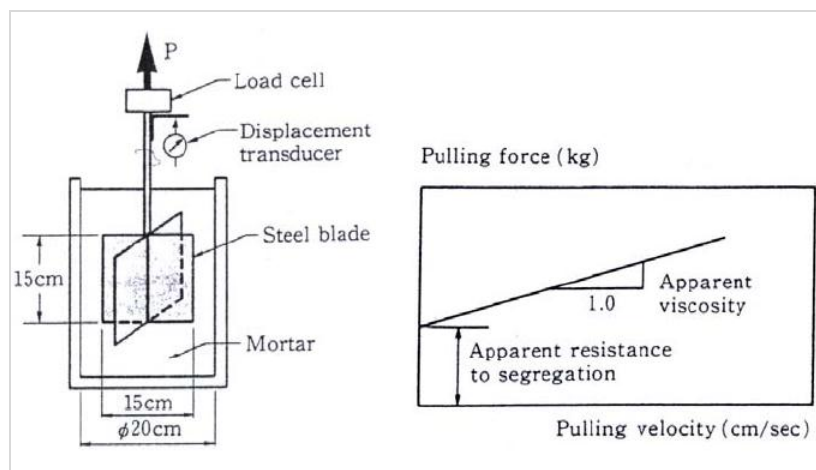


Figure I.30- Essai d'extraction d'une palette métallique [Tangtermsirikul et al, 1991]

En extrapolant les résultats pour une vitesse d'extraction nulle, ils définissent la force de résistance à la ségrégation. La pente de la droite obtenue correspond à la viscosité apparente du mortier. On peut se poser la question de la représentativité de la palette par rapport à un granulat.

Cet essai ne peut pas être utilisé sur chantier puisqu'il ne permet pas de tester des bétons et qu'un appareillage spécifique est nécessaire. Il présente cependant l'intérêt de fournir une mesure physique de la résistance à la ségrégation ce qui n'est pas le cas des autres essais.

I.6.2.2.6- Conclusion sur les essais disponibles

Le principal inconvénient des différents essais de stabilité statique est de ne pas être toujours répétables et parfois peu reproductibles [Cussigh, et al, 2003]. Le sens physique de certains essais peut également être mis en doute. Les différents essais réalisables sur éprouvettes de béton durci peuvent néanmoins servir de complément à un essai sur béton frais et peuvent éventuellement permettre de valider une approche [Sedran, 1999].

Ainsi, avant même de pouvoir imaginer un essai de réception du matériau frais sur chantier, il semble nécessaire de mettre en évidence et de comprendre les mécanismes élémentaires de la ségrégation dans les bétons.

Selon [deLarrard et al. 2000], les caractéristiques exigées à l'état frais pour les bétons auto-plaçant sont un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm, un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa, et une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa. Selon [Wallevik ,2003], le seuil exigé pour ces bétons doit être inférieur à 200 Pa. D'un point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600 mm. L'AFGC préconise aussi un étalement entre 650 et 800 mm (AFGC, 2000). Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton suffisamment fluide et qui ne présente pas de ségrégation.

Une observation visuelle permet aussi de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Éventuellement, une ségrégation apparaît sur le bord de la galette indiquant la présence de ressuage (film d'eau aux alentours de la galette). Ceci correspond à une longueur d'écoulement atteinte supérieure à 60 cm dans la boîte LCPC [Roussel, 2007 a] du fait de l'analogie entre l'essai au cône d'Abrams et la boîte.

I.7- Conclusion du chapitre

Pour les bétons, l'hydratation entre le ciment et l'eau qui est caractérisée par une réaction complexe, est à l'origine de l'évolution d'une microstructure hétérogène vue comme un milieu poreux évolutif composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux.

Le volume poreux, qui au départ correspond à la quantité d'eau libre présente au malaxage, va diminuer au fur et à mesure que l'hydratation progresse. Pour un milieu fermé (sans échange hydrique avec l'extérieur du matériau), un volume de vide, provoqué par la contraction des hydrates, apparaît dans ce réseau poreux engendrant une diminution de la saturation en eau et par conséquent de l'humidité relative. L'augmentation de ce volume de vide dans la porosité entraîne également une diminution de l'épaisseur de l'eau adsorbée à la surface des pores.

L'évolution de l'hydratation se traduit à l'échelle macroscopique par une évolution des propriétés mécaniques et des déformations endogènes.

Le BAP par rapport au béton ordinaire présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales,...etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fillers calcaires...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes de formulation et d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton.

Dans ce chapitre, en premier partie, il a été présenté une synthèse bibliographique documentée, passant en revue les différentes méthodes de formulation japonaises, et autres. Ces méthodes sont essentiellement basées sur l'optimisation du volume de pâte, des mortiers ou encore sur l'optimisation du squelette granulaire.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée aux différents essais et techniques de caractérisation des BAP, essentiellement à l'état frais, en mettant l'accent sur le travail qui a été fait au niveau européen ce qui a constitué le Guide Européen pour les BAP.

De la lecture de la bibliographie vienne cette recherche expérimentale sur les bétons en utilisant les matériaux locaux algériens. L'approche de formulation utilisée est basée sur les fondements de la méthode japonaise d'Okamura. Ainsi l'optimisation des formulations des BAP s'est effectuée à partir des résultats d'essais sur bétons. Plusieurs teneurs en fillers ont été envisagés.

Chapitre I Propriétés des bétons frais

Chapitre II Propagation d'ondes ultrasoniques dans les milieux hétérogènes du génie civil.

II.1- Introduction

Dans le cadre de ce travail, nous nous utilisons la méthode par ultrasons dont l'efficacité a été montrée dans plusieurs travaux [Fortin, 2005], [Eslami, 2010]. Ces études ont mis en évidence la sensibilité des ondes ultrasonores à la variation des propriétés mécaniques et géométriques des matériaux. En effet, les caractéristiques des ondes ultrasonores (notamment les vitesses de propagation et l'amplitude) subissent des modifications qui sont liées essentiellement à l'interaction de l'onde avec le matériau. Dès lors, plusieurs avantages se présentent et confèrent à ces méthodes une potentialité vis-à-vis de l'évaluation des propriétés et donc de la ségrégation du béton.

Les méthodes à ultrasons sont utilisées pour mesurer l'uniformité. De plus, les ondes à ultrasons peuvent être employées pour détecter des fissures et des cavités dans les structures.

La méthode d'auscultation par ultrasons la plus courante pour l'évaluation des structures en béton est la méthode par vitesse de pulsation. Elle a été utilisée avec succès autant en laboratoire que sur le chantier. Il est possible d'utiliser cette technique pour évaluer la qualité d'un béton ainsi que pour en faire l'analyse de sa détérioration. La détermination du module d'élasticité dynamique et du rapport de Poisson est l'utilisation la plus directe de ce système et la plus acceptable du côté théorique. De nombreux chercheurs ont publié des résultats sur ces deux propriétés [Naik et Malhotra, 1991]

La méthode par vitesse de pulsations peut également être très utile pour l'étude de l'homogénéité et de la qualité du béton. L'hétérogénéité dans le béton crée des dispersions de pulsations. Ces dispersions sont causées par des facteurs indirects tels que la source d'approvisionnement du béton, les ingrédients du mélange et les problèmes de consolidation (vibration) lors de la mise en place du béton en chantier. Il est possible de faire des comparaisons qualitatives de bétons in situ. D'autres applications sont couramment utilisées telles que : la vérification de la densité et la localisation d'alvéoles dans le béton. Dans un ouvrage de grande importance sur le développement de la technique par ultrasons, [McHenry et Oleson, 1967] citent dix cas types où la mesure des vitesses de pulsations est un supplément avantageux pour la détermination de procédures de réfections de barrages. [Elvery et Din, 1969] montrent qu'il est parfois avantageux d'utiliser les résultats dynamiques de la résistance à la compression, qui proviennent des vitesses de pulsations, plutôt que ceux des essais statiques de compression sur des échantillons de béton prélevés par carottage. Le but de ces études a porté sur la détermination de la résistance en flexion de poutres en

béton armé. Les auteurs mettent en évidence la possibilité, via la méthode à ultrasons, de clairement identifier à l'intérieur des poutres des régions de résistances inférieures et évaluent l'influence de ces zones sur le comportement en flexion des poutres.

Aujourd'hui, la majorité des avancées technologiques s'effectuent en laboratoire. [Lozev et col. 1996] présente une étude de la consolidation du béton à l'aide d'un interféromètre à pulsation d'ultrasons. Dans leur recherche, ils établissent une corrélation entre le niveau de consolidation du béton et la vitesse de propagation des ultrasons. Ils ont démontré l'influence importante des facteurs du processus de cure sur la vitesse de propagation des ondes. Ils terminent leur recherche en affirmant que leur méthode est efficace pour l'évaluation du niveau de consolidation pendant et après la période de cure.

[Selleck et al, 1998] étudient le phénomène des fissures distribuées à l'aide de la technique par ultrasons. Les faits saillants de leur étude sont la découverte que les ondes d'ultrasons sont peu susceptibles à la microfissuration du béton. Cependant, l'amplitude des signaux change considérablement. Un aspect important de cette recherche est l'utilisation d'un processus de gel dégel pour réaliser le niveau de microfissuration voulue. Malgré une diminution de la vitesse de propagation des ondes de compression au fur et à mesure que les cycles de gel dégel progressent, le taux de diminution est faible. Les auteurs de cette recherche indiquent qu'une diminution de 25 à 50 % du niveau de module d'élasticité dynamique correspond à une diminution de 3 à 9 % de la vitesse de propagation des ondes.

II.2- Généralités sur les ondes ultrasonores

Par définition les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kHz à plus de 100 MHz. La gamme de 0,1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques.

II.2.1- Principe

Le principe de base du contrôle ultrasonore consiste à envoyer une onde élastique par l'intermédiaire d'un transducteur dans le matériau à contrôler. Il existe en général, deux modes principaux d'utilisation des ultrasons, au contact et en immersion :

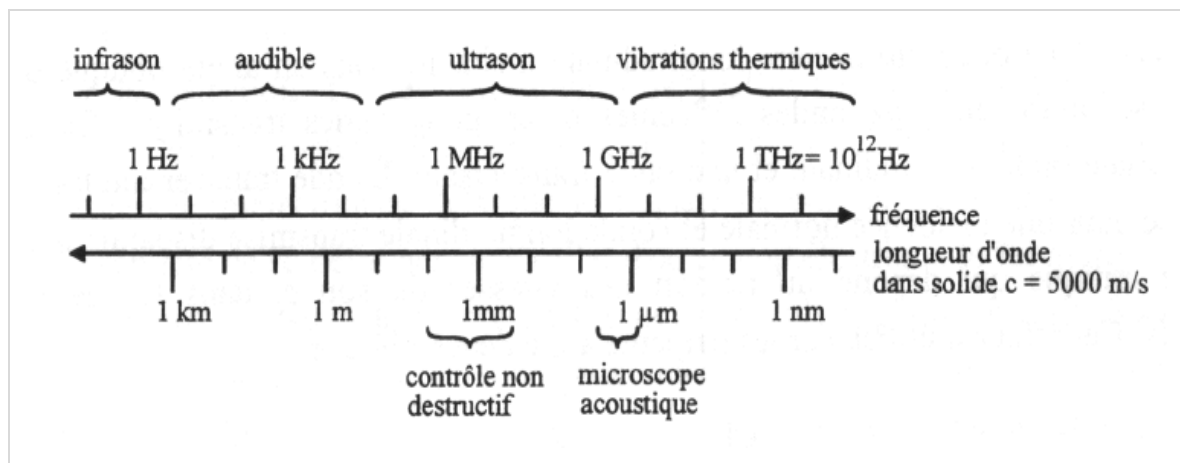


Figure II.1- Échelle des ondes élastiques [Jacques, 2012].

Contrôle par contact : Les transducteurs ultrasonores sont directement placés sur les faces de l'échantillon à contrôler, la bonne liaison acoustique est assurée par un agent de couplage qui est généralement l'air ou un fluide visqueux tel que l'eau, ainsi l'onde acoustique est générée et réceptionnée au contact direct de l'échantillon. L'épaisseur du couplant est de l'ordre du dixième de millimètre.

Contrôle par immersion : Les transducteurs sont situés à une certaine distance de la pièce. Le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Ces techniques sont largement mises en œuvre dans nombreuses applications parmi lesquelles on retiendra comme exemple la détermination de défauts microscopiques ou macroscopiques et la détermination des propriétés intrinsèques des matériaux [Lhermitte *et al.* Yehet *al.* 2003].

Les ondes ultrasonores, qui sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout le matériau ayant une certaine élasticité. Les techniques ultrasonores sont largement utilisées pour le contrôle des bétons ordinaires, mais aussi pour les bétons spéciaux comme auto-plaçant et le béton fibré à ultra haute performance [Bian, 2009].

Physiquement, les ondes longitudinales (onde P), transversales (onde S) et de Rayleigh sont les principaux types de propagation ultrasonore. Les modes de propagation P et S sont appelées ondes de volume. Elles se propagent dans tout le matériau et sont définies pour un milieu infini. En présence de conditions aux limites liées au caractère fini du milieu (présence d'interfaces), d'autres types d'ondes apparaissent. L'onde de Rayleigh, R, résulte d'interférences des ondes P et S, et apparaît dans un milieu semi infini au voisinage de la surface libre. Sa propagation est une combinaison de vibrations (déplacement des particules élémentaires) de compression et de cisaillement. Les vibrations de cisaillement sont plus importantes que celles de compression,

notamment au voisinage de la surface. Son amplitude est décroissante en fonction de profondeur d'investigation. L'onde de Rayleigh est plus lente que les ondes de volume P et S. De plus, les autres types d'ondes telles que les ondes de Lamb, de Love, de Stoneley et de Scholte sont également citées dans la littérature. Elles se distinguent par la nature de l'interface entre deux milieux différents.

Une mesure par ultrasons peut être exploitée, soit par la vitesse (célérité) de propagation, soit par l'atténuation de l'amplitude d'ondes. La mesure de vitesse est la plus couramment utilisée en laboratoire et sur site. Dans un milieu élastique infini, les ondes se propagent en deux modes P et S, donc ses vitesses (V_p , V_s) dépendent des propriétés mécaniques des matériaux. Il est possible de démontrer que ces vitesses dépendent du module d'élasticité E , du coefficient de Poisson ν , et de la densité ρ (masse volumique) (Éq. II.1).

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (\text{II-1})$$

Ces relations permettent de déduire les propriétés élastiques d'un matériau isotrope à partir des vitesses V_p et V_s :

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \nu = \frac{1}{2} \frac{1 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad (\text{II-2})$$

En réalité, la méthode de détermination de la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton est définie par les normes (EN 12504-4) et (ASTM C597). La vitesse ultrasonore peut être liée aux propriétés mécaniques du béton (ex. résistance à la compression) en utilisant des corrélations empiriques. Une procédure de la détermination de ces corrélations est décrite dans la norme [EN 13791, 2007]. Par contre, la mesure d'atténuation est essentiellement réalisée en laboratoire, qui permet aussi de caractériser les évolutions du béton, notamment lors de son jeune âge, ou en cas d'endommagement.

Les caractéristiques ultrasonores principales qui sont exploitées sont :

- **La vitesse** de propagation dans le milieu, qui est directement associée à la densité du matériau et ses propriétés élastiques.

$$V = L/T \text{ (en km/s ou m/s)} \quad (\text{II-3})$$

Où V ; est la vitesse d'impulsion longitudinale, L ; est la longueur du chemin, T ; est le temps pris par l'impulsion pour parcourir cette longueur.

- **L'atténuation** dans le matériau, qui est liée à la viscosité du matériau.

Le signal ultrasonique qui se propage dans un milieu s'atténue au cours de son trajet. Cette atténuation est due à des interactions entre l'onde et le milieu de propagation qui

provoque une diminution de l'amplitude de l'onde et une perte préférentielle de ses hautes fréquences. L'atténuation est quantifiée par un coefficient d'atténuation [Pierre, 2000]. Il existe deux types d'atténuation

- Dans le cas d'un milieu homogène parfaitement élastique, l'atténuation est apparente, sans perte d'énergie. Elle est liée à la divergence du faisceau ultrasonore. Elle est nulle dans le cas de l'onde plane et inversement proportionnelle à la distance par rapport à la source pour une onde sphérique.

- Dans un milieu non homogène ou non élastique, s'ajoute une perte d'énergie due aux interactions entre la microstructure du milieu et l'onde. Dans ce cas on distingue l'atténuation intrinsèque et extrinsèque. La première ne dépend ni de la géométrie, ni de la méthode et de la configuration de mesure mais plutôt de la nature du matériau. En effet ce type d'atténuation est causé par deux catégories de phénomènes [Marie, 2006, Pierre, 2000 et Cuxac, 1991] :

- L'absorption : Elle résulte de la conversion de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur. Ce type d'atténuation intrinsèque est lié à la viscosité du matériau contrôlé. La dissipation de l'énergie sous forme de chaleur est due d'une part à des pertes thermo-élastiques résultant du déphasage entre contrainte et déformation, et d'autre part au non linéarité entre la contrainte et le déplacement atomique. Certains défauts cristallins comme les dislocations peuvent contribuer à l'atténuation par absorption.

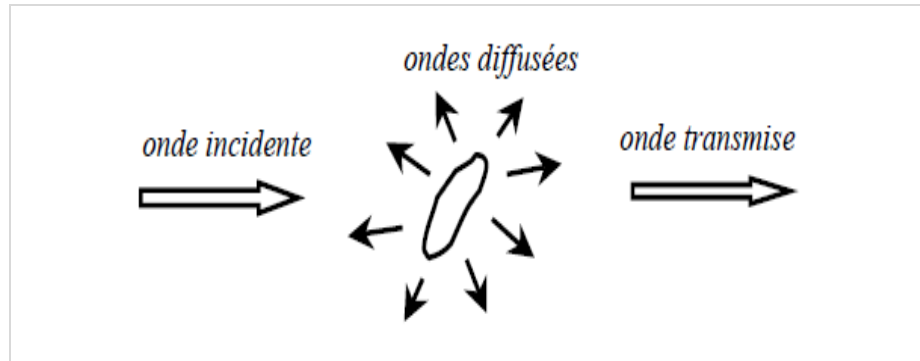


Figure II.2- Diffusion par une hétérogénéité (D'après [Marie, 2006] et [Cuxac, 1991]).

- La diffusion : Dans le cas de la diffusion (aussi appelée dispersion), une fraction de l'onde est déviée ou réfléchié lors de la rencontre de discontinuités de l'impédance acoustique. Ces hétérogénéités acoustiques peuvent être des pores, des précipités, des inclusions, des joints de grains, ou encore des défauts... Ici, une partie de l'énergie "quitte" le trajet rectiligne prévu par la théorie.

L'autre type d'atténuation dite extrinsèque est dû à la diffraction de l'onde sur les discontinuités ou obstacles dans le matériau (grains, pores, microfissures). Ce type d'atténuation peut être important lorsque la longueur d'onde devient comparable à la taille de l'hétérogénéité. Le calcul de l'atténuation est généralement réalisé à l'aide

d'une méthode dite rapport des spectres. En effet, l'amplitude spectrale d'un signal propagé dans le matériau décroît de manière exponentielle par rapport à la distance l :

$$A^{\text{ref}}(f) = A^0(f) G^r(l) e^{-\alpha^r(l) \cdot l} \quad (\text{II.4})$$

$$A(f) = A^0(f) G^r(l) e^{-\alpha(f) \cdot l} \quad (\text{II.5})$$

Dans les équations (IV.4) et (IV.5), $A^0(f)$, $A^{\text{ref}}(f)$ et $A(f)$ sont respectivement les amplitudes spectrales de l'onde émise et des ondes reçues sur les échantillons d'un milieu de référence et du milieu étudié. En plus $\alpha^r(f)$ et $\alpha(f)$ sont les coefficients d'atténuation de ces deux milieux qui dépendent de la fréquence f . Le facteur géométrique $G(f, l)$ présente la réflexion, réfraction et diffraction. Ainsi, le rapport des spectres s'écrit comme suivant :

$$\text{Ln}(A^r/A) = \text{ln}(G^r/G) + (\alpha(f) - \alpha^r(f)) \cdot l ; \quad (\text{II.6})$$

Considérons la même géométrie de deux échantillons du milieu de référence et du milieu étudié : le rapport G^r/G indépendant de la fréquence est égal à 1 et donc le premier terme à droite de l'équation (IV.7) est égal à zéro. D'ailleurs, au laboratoire, l'aluminium est souvent choisi comme le milieu de référence due au fait que son coefficient d'atténuation est très faible $\alpha^r \approx 0$. Nous avons ainsi :

$$\alpha(f) = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{A^r}{A}\right) \quad (\text{II.7})$$

Généralement le coefficient d'atténuation dépende linéairement de la fréquence f . Ainsi ce coefficient peut être déterminé à partir de la pente de la courbe représentant le rapport des spectres $\text{ln}(A^r/A) / l$.

Le coefficient d'atténuation peut être évalué en (Np/m) ou (dB/m) grâce à la relation suivante

$$\alpha [dB / m] = 8.686 [Np / m] \quad (\text{II.8})$$

L'atténuation des ondes peut également être caractérisée par un paramètre dit facteur de qualité Q qui est inversement proportionnel avec le coefficient d'atténuation :

$$Q = \frac{\pi \cdot f}{v \cdot \alpha} \quad (\text{IV.9})$$

Concernant la fiabilité d'évaluation des propriétés du béton, il est nécessaire de préciser des problèmes rencontrés de quatre ordres : la mise en œuvre, l'étalonnage de la mesure, l'interprétation des données, l'exploitation des résultats [Garnier 2005].

Lors de la mise en œuvre, la vitesse mesurée peut être affectée par plusieurs facteurs tels que le gel couplant influençant la répétabilité des mesures, le type de transducteur, la présence d'armatures, les conditions de mesures (ex. humidité, température), les conditions latérales du milieu traversé, etc. [Garnier 2012].

II.3- Equipement pour test de vitesse d'impulsion

L'équipement consiste essentiellement en un générateur d'impulsions électriques, une paire de transducteurs, un amplificateur et un dispositif électronique de chronométrage pour mesurer l'intervalle de temps entre les initiations d'une impulsion générée au niveau du transducteur d'émission et son arrivée à la transducteur récepteur.

Deux formes d'appareils électroniques de chronométrage et d'affichage sont disponibles, dont l'une utilise un tube à rayons cathodiques sur lequel l'impulsion reçue est affichée par rapport à un temps approprié échelle, l'autre utilise une minuterie d'intervalle avec un dis numérique lecture directe

L'équipement doit avoir les caractéristiques suivantes. Il devrait être capable de mesurer le temps de transit sur des distances allant d'environ 100 mm au maximum épaisseur à inspecter avec une précision de $\pm 1\%$. En général, les transducteurs utilisés doivent être la gamme de 20 à 150 kHz bien que des fréquences aussi basses que 10 kHz puissent être utilisées très longtemps longueurs de trajets en béton et jusqu'à 1 MHz pour les mortiers et les coulis ou pour les courtes distances.

Les impulsions à haute fréquence ont un début bien défini mais, lorsqu'elles traversent le béton, s'atténuent plus rapidement que les impulsions de fréquence inférieure. Il est donc préférable d'utiliser des transducteurs à haute fréquence pour les courtes distances et des transducteurs à basse fréquence longueurs de trajet. Les transducteurs d'une fréquence de 50 kHz à 60 kHz conviennent à la plupart des applications.

IV.4- Forme et taille de l'échantillon

La vitesse des courtes impulsions de vibration est indépendante de la taille et de la forme du spécimen dans lequel ils voyagent, à moins que sa moindre dimension latérale soit inférieure à la valeur minimum. En dessous de cette valeur, la vitesse d'impulsion peut être réduite de manière appréciable. L'ampleur de cette réduction dépend principalement du rapport de la longueur d'onde des vibrations d'impulsion à la dimension latérale la plus petite de l'échantillon mais elle est insignifiante si le rapport est inférieur à l'unité.

Le tableau II.1 donne la relation entre la vitesse d'impulsion dans le béton, le transducteur fréquence et la dimension latérale minimale admissible de l'éprouvette.

II.5- Utilisation de transducteurs

L'utilisation de transducteurs permet de contrôler la forme et la durée de l'impulsion afin d'avoir une source répétitive et très énergétique. Les transducteurs sont constitués d'une pastille piézo-électrique, qui peut se déformer sous la sollicitation d'un courant électrique ou bien générer un courant électrique sous l'effet d'une déformation. Ils

peuvent donc être utilisés à la fois en émission et en réception et nécessitent d'être en contact avec le matériau à ausculter.

Table II.1- Effect of specimen dimension on pulse transmission
[Ould-Naffa et al. 2002]

Transducer frequency	Pulse velocity in concrete (km/s)		
	v_c	v_c	v_c
	Minimum permissible lateral specimen dimension		
KHz	mm	mm	mm
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Ces transducteurs peuvent être résonnants à une fréquence donnée, ou large bande autour d'une fréquence centrale, mais la largeur de bande utile n'est jamais très étendue (quelques centaines de kHz). Ils émettent généralement des ondes de compression, mais certains peuvent émettre des ondes de cisaillement [Ould-Naffa et al. 2002]. L'utilisation de sabot fixe au transducteur permet de favoriser la génération d'ondes de Rayleigh à la surface du béton [Piwakowski et al. 2004]. Les transducteurs sont les moyens de génération et de détection les plus couramment utilisés pour le contrôle non destructif des matériaux.

Les inconvénients majeurs des transducteurs sont leurs dimensions parfois importantes, allant jusqu'à plusieurs centimètres de diamètre. On ne peut pas déterminer avec précision un point d'émission équivalent ou un point de réception comme c'est le cas avec une source ou un récepteur ponctuel. Un couplant (gel, graisse, colle) doit également être utilisé pour assurer un bon couplage entre le transducteur et le matériau à ausculter, ce qui peut dégrader la répétabilité des mesures, et allonger le temps de mise en place de la mesure.

IV.6- Auscultation sonore

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages [Malhotra et Carino, 1991]. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises (NF-EN-12504-4, 2005) et Américaines (ASTM-C597-02, 2003), et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures. Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton en transmission, en réflexion, ou à la

surface. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur.

Cette méthode permet principalement de détecter entre autres choses un non uniformité des propriétés de la structure, des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de "nids de cailloux". Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations II.1 et II.2 [Zhou et al. 1995 ; Qixian et Bungey, 1996 et Wu et al. 1995].

Cependant, la vitesse mesurée dépend également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par tests quasi-statiques de compression en laboratoire [Popovics, 1996], et l'emploi de cette méthode pour déterminer les valeurs E et ν en grande déformation est déconseillée par la norme [ASTM-C597-02, 2003].

II.7- Les différents types des ondes ultrasonores

Une onde, représente la propagation des perturbations d'un milieu par rapport à sa position d'équilibre. Dans le cas des ondes mécaniques, la perturbation est un déplacement d'une particule du milieu. Selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire.

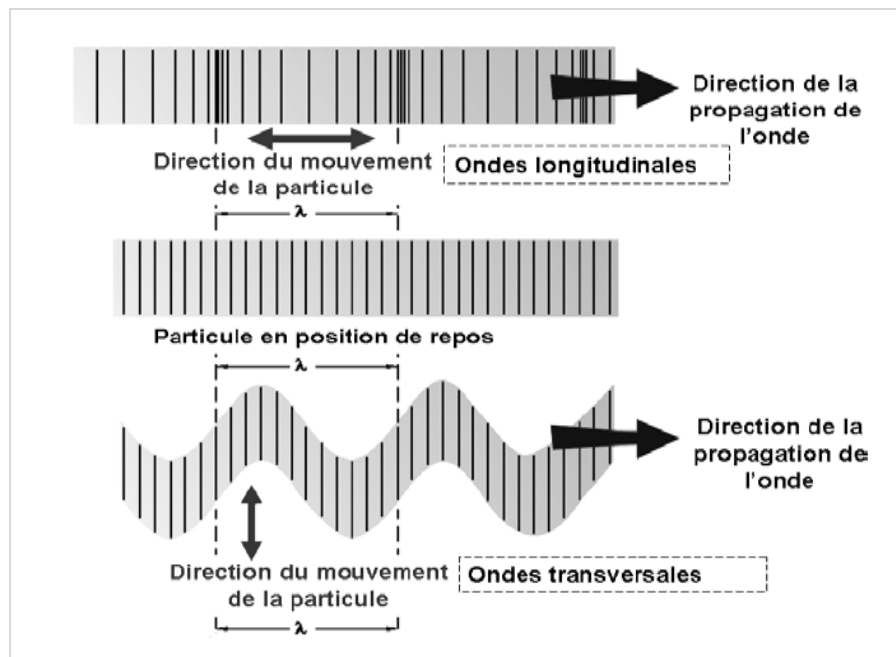


Figure II.3- Propagation et polarisation des ondes longitudinales et transversales (D'après [Marie 2006]).

II.7.1- Vibrations longitudinales

La direction de déplacement des particules est appelée polarisation, et lorsque l'on peut mettre en évidence, au moins localement, une direction de propagation, ces ondes prennent le nom d'ondes longitudinales. Leur polarisation est en effet parallèle à la direction de propagation [Jean, 2012 et Cuxac, 1991].

Les vibrations longitudinales sont produites quand la direction de vibration est parallèle à l'axe longitudinal de l'éprouvette. Pour cela les transducteurs doivent être placés selon le schéma de la figure IV.5. Pour un prisme le mode fondamental d'oscillation implique un nœud au milieu et des ventres aux extrémités. Il en résulte :

$$\lambda = 2L$$

ou :

λ : La longueur d'onde

L : Longueur de l'éprouvette étudiée.

Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de l'oscillation fondamentale, mais seuls les harmoniques impairs correspondent à un nœud au milieu de l'éprouvette.

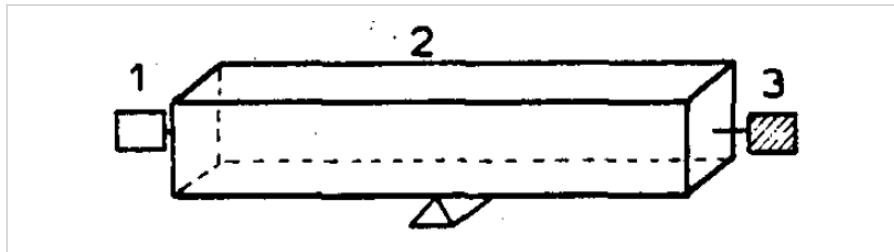


Figure II.4- Emplacement des transducteurs dans l'éprouvette

II.7.2- Autres types d'Ondes.

L'onde plane est définie, dans un milieu sans atténuation acoustique, par le déplacement (ou élongation) de chaque particule par rapport à sa position moyenne x (qui est aussi sa position d'équilibre dans le milieu de propagation en l'absence d'excitation acoustique) à l'instant t :

$$\vec{u} = \vec{U} \cos \omega \left(t - \frac{x}{V} \right) \quad (\text{II.10})$$

Avec U ; amplitude des élongations, V ; vitesse de propagation de l'onde acoustique de pulsation, $\omega = 2\pi f$ et f , la fréquence des ultrasons.

L'équation (II.10) est associée à une onde acoustique progressive, se déplaçant vers les x positifs. La longueur d'onde λ des ultrasons est donnée par :

$$\lambda = V/f = VT \quad (\text{II.11})$$

Avec T ; période des ultrasons. Le vecteur d'onde k a pour amplitude $2\pi/\lambda$.

Sous l'influence de l'onde acoustique, deux situations peuvent se produire (figure II.5) :

1^{er}, \vec{U} est parallèle à x : on a affaire à des ondes acoustiques longitudinales ;

Le champ de déplacement peut être décrit par, bedford et drumheller.

$$U_1 = U_1(x_1, t) \quad U_2 = 0 \quad U_3 = 0$$

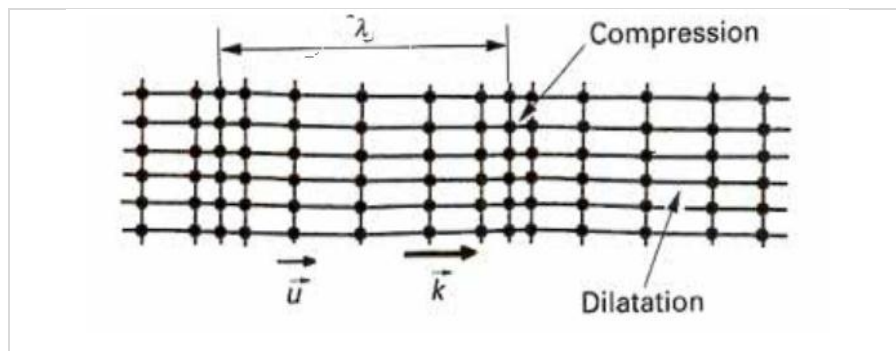


Figure II.5 - Propagation Longitudinale d'une onde acoustique

Pour cette onde plane longitudinale se propageant suivant x . Le déplacement est donné par l'équation (IV.10). La vitesse v des particules par l'équation (II.12)

$$v = -U\omega \sin \omega(t - \frac{x}{v}) \quad (II.12)$$

2^{eme} : \vec{U} est perpendiculaire à la direction x de propagation : c'est le cas des ondes acoustiques transverses (ou de cisaillement).

$$U_1 = 0 \quad U_2 = 0 \quad U_3 = U_3(x_3, t)$$

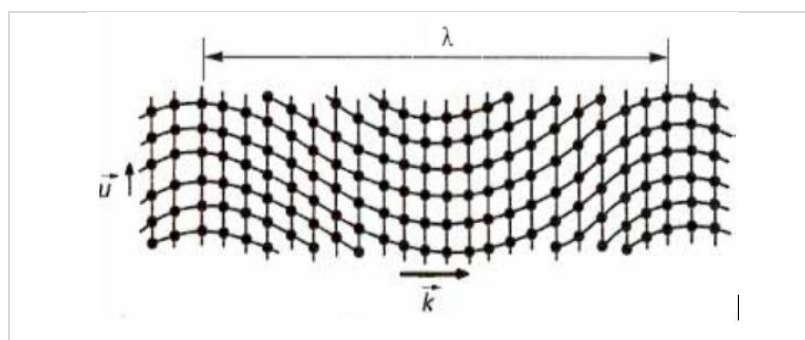


Figure II.6- Propagation transverse d'une onde acoustique

À chaque type d'onde acoustique, longitudinale ou transverses, est associée dans un milieu donné une vitesse longitudinale V_L ou transverse V_T . En général;

$$V_L \approx 2V_T.$$

Les ondes transverses ne peuvent se propager que dans les solides, les fluides (liquide ou gaz) ne constituant pas un support matériel pour ce type de vibrations, à l'exception toutefois des liquides extrêmement visqueux où les ondes transverses arrivent à se propager malgré une forte atténuation.

II.8- Sensibilité des ondes de volume à la granulométrie et la composition des bétons.

II.8.1- Influence du rapport E/C

La porosité des pâtes de ciment dépend directement du rapport E/C utilisé dans la formulation. La dimension des pores est en général beaucoup plus petite que dans le cas d'une porosité artificielle (10^{-3} - $10^3 \mu\text{m}$), et la porosité peut varier de 11% à 18%. A hautes fréquences ($>1,5\text{MHz}$), sur des blocs de ciment ou de mortier dont le rapport E/C varie de 0,45 à 0,65, des mesures en ondes de compression montrent que le rapport E/C influence fortement sur le facteur d'amortissement [Vergara et al. 2001]. Par contre, des mesures similaires à plus basses fréquences (inférieures à 800 kHz) montrent que les variations du facteur d'amortissement en fonction du rapport E/C sont plus faibles [Philippidis et Aggelis, 2005]. Quelle que soit la fréquence considérée, les mesures de vitesses des ondes de compression montrent une très forte sensibilité avec le rapport E/C .

Des études similaires ont été réalisées sur du béton contenant cette fois des granulats de taille importante ($D_{\text{max}} = 37,5\text{mm}$) [Philippidis et Aggelis, 2003, 2005] dans la bande de fréquences 20-800 kHz. Les résultats sont globalement comparables à ceux obtenus sur du ciment ou du mortier, mais du fait du plus grand degré d'hétérogénéité, les allures des courbes de vitesse ou d'amortissement avec la fréquence présentent de brusques variations rendant plus difficile la comparaison des résultats que dans le cas du mortier.

Que ce soit sur du ciment, du mortier ou du béton, des variations du rapport E/C influent fortement sur les valeurs de vitesse. Les variations du facteur d'amortissement sont importantes pour les plus hautes fréquences, mais sont relativement faibles en dessous de 1MHz, la précision de l'estimation de ces facteurs d'amortissement doit donc être très grande, ce qui est rendu d'autant plus difficile par la présence des granulats.

II.8.2- Influence du taux de saturation

La teneur en eau du béton représente le taux volumique d'eau libre dans le matériau, elle peut être comprise entre environ 4 et 14%. On peut également l'exprimer en termes de taux de saturation du béton, compris alors entre 0 (matériau complètement "sec") et 100% (complètement saturé), bien que ces valeurs extrêmes ne soient jamais atteintes

en pratique. Ce taux de saturation influe sur la vitesse de propagation des ondes mécaniques dans le béton [Ohdaira et Masuyama, 2000] ainsi que dans des roches [Bourbié et al. 1986]. Les études sur les effets du taux de saturation sur différents bétons [Villain et al. 2008 ; Piwakowski et al. 2008]. Ont montré que la variation de vitesses de phase avec la teneur en eau est importante et ne varie pas linéairement avec le taux de saturation.

II.8.3- Influence des inclusions rocheuses (sables et granulats)

Les effets de l'absorption et de la diffusion par les sables sur l'amortissement des ondes de Rayleigh (200-1200 kHz) dans du mortier, ont été quantifiés par [Jacobs et Owino, 2000]. Leur conclusion est que dans le mortier, les pertes par diffraction sur les grains de sable ($D = 1 \div 3 \text{ mm}$) sont négligeables par rapport à l'amortissement intrinsèque, l'amortissement mesuré étant principalement linéaire avec la fréquence. [Chaix, 2003] étudie dans sa thèse l'influence du taux de sable et des dimensions des grains dans du ciment (D variant de 1 à 8 mm), dans la bande fréquentielle 250-1250 kHz. L'ajout de sable dans le ciment provoque une augmentation des valeurs de vitesse et d'atténuation mesurées pour les ondes P. Entre les mortiers contenant différents taux et différentes dimensions de grains de sable, les différences ne sont visibles sur l'atténuation que pour les fréquences les plus élevées ($> 800 \div 1000 \text{ kHz}$). Les valeurs de vitesses sont très sensibles au taux d'inclusions pour toutes les fréquences, mais assez peu aux dimensions des inclusions.

Dans le cas de granulats de dimensions plus importantes, l'évaluation de l'atténuation devient plus délicate dans la même bande fréquentielle. En particulier, [Landis et Shah, 1995], présentent des courbes d'atténuation des ondes P pour une pâte de ciment (sans inclusions), du mortier "fin" ($D_{\max} = 1 \text{ mm}$), du mortier "grossier" ($D_{\max} = 5 \text{ mm}$) et du béton ($D_{\max} = 10 \text{ mm}$). L'allure de la courbe d'atténuation semble relativement uniforme avec la fréquence jusqu'à une fréquence limite qui diminue à mesure que D_{\max} augmente (Fig. II.7). Au-delà de cette fréquence limite, l'atténuation présente un saut important et a un comportement fréquentiel erratique : la dimension des hétérogénéités devient comparable à la longueur d'onde et les effets de la diffusion multiple deviennent alors très importants, le comportement des courbes d'amortissement reflète le caractère aléatoire de la configuration d'hétérogénéités rencontrée au cours de la propagation.

Dans le cas de bétons ayant des granulats plus gros ($D_{\max} = 37,5 \text{ mm}$) la différence d'atténuation des ondes P avec le mortier ($D_{\max} = 4,75 \text{ mm}$) est relativement faible pour des fréquences inférieures à 100 kHz et augmente progressivement avec la fréquence [Philippidis et Aggelis, 2005]. Cet écart est d'autant plus important et survient d'autant plus à basse fréquence que le rapport E/C est élevé. Ces effets sont attribués à l'existence d'une zone interfaciale entre les granulats et la pâte de ciment [Otsuki et

al. 2000]. La vitesse de phase mesurée sur le béton est plus élevée que celle mesurée sur le mortier quelle que soit la fréquence considérée

De part, sa structure très complexe, l'étude du béton en utilisant la propagation des ondes mécaniques est très délicate.

Un grand nombre de facteurs (hétérogénéités à différentes échelles, teneur en eau, formulation, température, etc.) peut influencer sur la propagation, le plus souvent de manière combinée. Les résultats de mesure sont donc difficiles à interpréter, notamment lorsqu'il s'agit d'isoler l'influence d'un seul de ces effets.

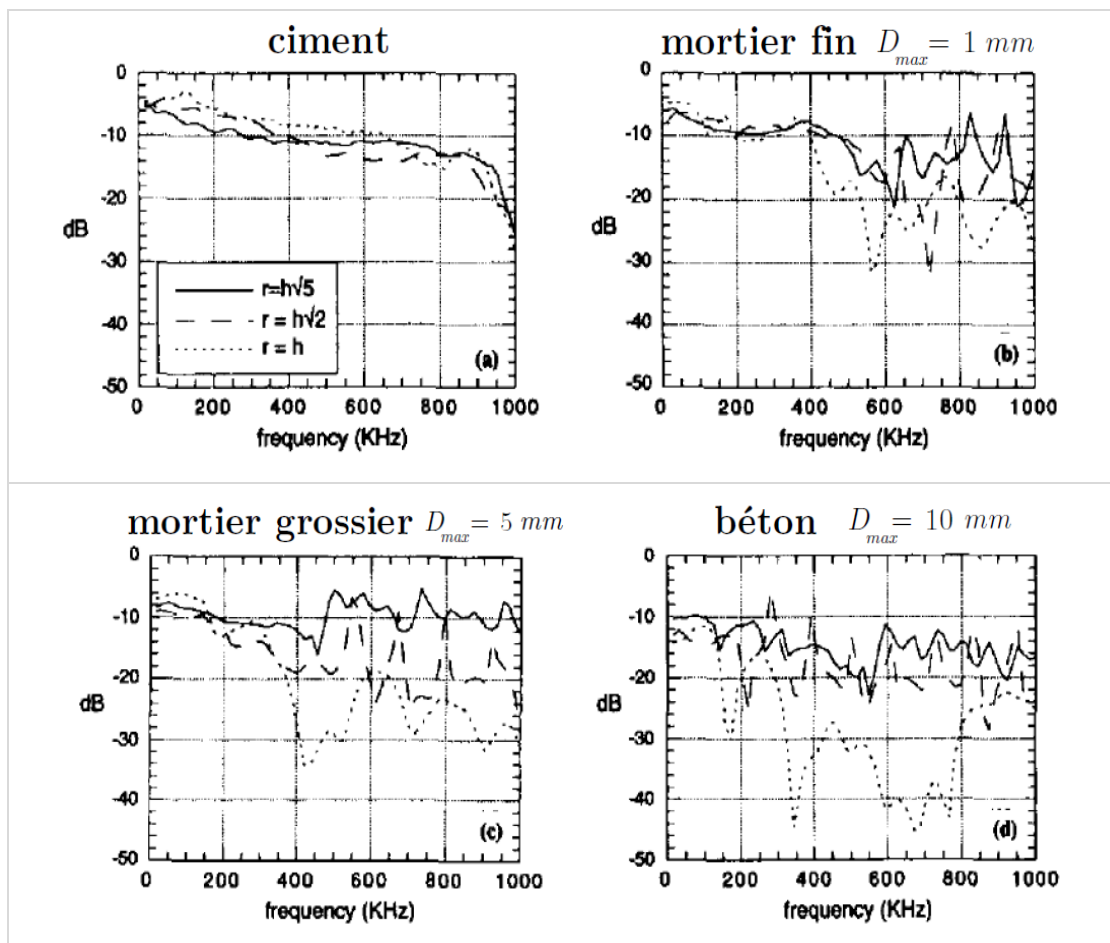


Figure II.7- Variations de l'atténuation des ondes P pour différents D_{max} , prises à différents endroits des spécimens, d'après [Landis et Shah, 1995].

Une bonne interprétation des résultats de mesures sur du béton va donc passer par l'emploi de méthodes de mesures expérimentales et de traitement de données permettant une évaluation des paramètres de propagation (vitesse de phase et amortissement), avec une précision suffisante pour pouvoir détecter de faibles variations de propriétés du béton. D'autre part, l'emploi d'une modélisation analytique peut permettre de réaliser une étude de sensibilité des mesures et d'aider à l'interprétation des résultats.

II.9- Conclusion

Dans ce chapitre il a été présenté, la propagation en milieu hétérogène du point de vue théorique. L'étude de la propagation dans de tels milieux passe par l'évaluation d'un champ moyen appelé champ cohérent, obtenu après moyenne sur un très grand nombre de réalisations du désordre. Ce champ cohérent décrit, sous certaines conditions, la propagation dans un milieu homogène effectif. Ce milieu homogène effectif possède un nombre d'onde complexe dépendant de la fréquence ; il est dispersif et atténuant.

L'étude bibliographique montre que la méthode des ultrasons peut être utilisée comme un outil efficace pour la caractérisation de la ségrégation. En combinant cette méthode avec les essais classiques de caractérisation il serait possible de pouvoir suivre la variation des propriétés et de répondre aux questions concernant les mécanismes responsables du changement microstructural du béton.

Chapitre **II** Propagation d'ondes ultrasoniques dans
les milieux hétérogènes du génie civil.

L'approche expérimentale s'articule sur des essais comparatifs de la caractérisation de la ségrégation pour différentes compositions de béton. Cette comparaison concerne deux techniques standards (tamis et colonne) par rapport à un essai non destructif par le biais d'impulsions ultrasoniques. Les essais ont été réalisés sur des mélanges conçus pour avoir différents niveaux de résistance à la ségrégation. Des corrélations ont été effectuées en fonction de divers indices de ségrégation pour évaluer la fiabilité de cette méthode non destructive quant à la caractérisation de la ségrégation des bétons par rapport aux méthodes traditionnelles.

III.1- Procédure expérimentale

Le programme expérimental mis au point concerne donc des essais de stabilité au tamis, tels que décrits par les recommandations européennes pour les BAP [EFNARC, 2005] et la norme [EN 12350-11, 2010], des essais de stabilité à la colonne [Cussigh et al 2003, BS 1881, Sonebi 2005 et Rooney et al 2001], et des essais ultrasoniques pour la caractérisation non destructive de la ségrégation.

Auparavant, on a procédé à la caractérisation de la fluidité des différents par le biais des essais d'étalement.

III.1.1- Essais de stabilité au tamis

Ces essais ont été réalisés conformément à la norme européenne pour la résistance à la ségrégation [EN 12350-11, 2010]. Le test vise à étudier la résistance du mélange de béton à la ségrégation en permettant à un échantillon de béton de 10l de subir une possible ségrégation statique pendant 15 minutes (dans un seau). Une éventuelle observation et notation de la présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau est faite, (fig. III.1.a). Ensuite, la couche supérieure de l'échantillon (4,8 kg \pm 0,2) est versée sur un tamis de 5mm. Le mortier traverse ensuite le tamis. Un indice π (pourcentage massique de l'échantillon passant au travers du tamis) est déterminé à l'aide de l'équation (III.1) et exprimé en% au 1% près [AFGC, 2000].

Une plus grande partie du mortier traversant le tamis caractérise une plus grande proportion à la ségrégation (fig. III.1.b).

$$\pi = \frac{M_{cs}}{M_c} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Où M_{cs} : masse de mortier recueillie à travers la taille d'ouverture du tamis de 5 mm
 M_c : masse initiale de la couche supérieure



Figure III.1.a- Essai au tamis et critère de stabilité (ressuage à la surface)

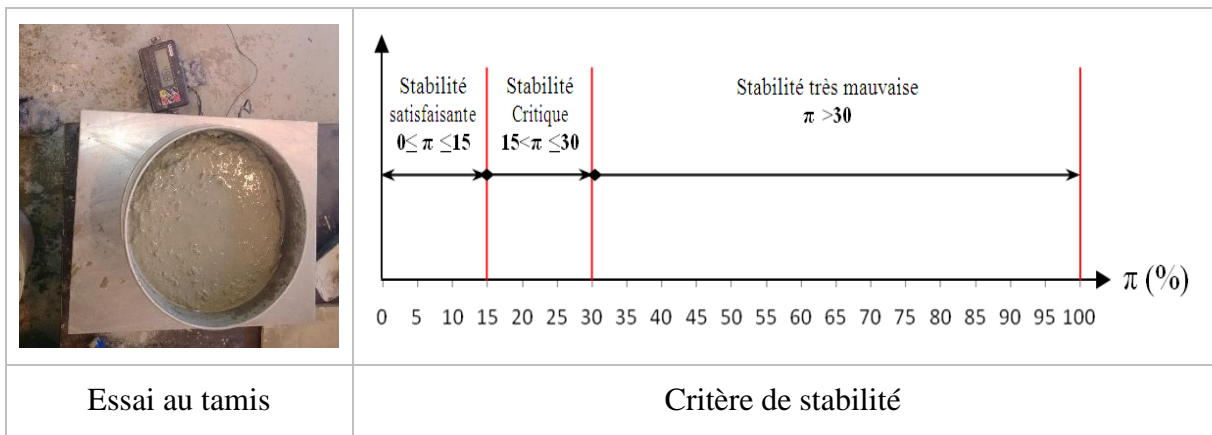


Figure III.1.b- Critère de stabilité de l'essai au tamis

III.1.2- Essais de stabilité à la colonne

Dans cet essai, le béton frais est placé dans un tube (section = 100 x 100 mm, hauteur = 500 mm), séparable en trois parties. Après 60 minutes (un temps plus long que celui de l'essai à la colonne qui a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley [RILEM.TC145], le béton est extrait de la partie supérieure (A=100x100x100 mm) et de la partie inférieure (B

=100x100x100 mm) du tube. Après avoir été lavés à travers un tamis, les échantillons sont analysés pour déterminer la proportion de gros granulats de chacune des parties (fig.III.2.a).

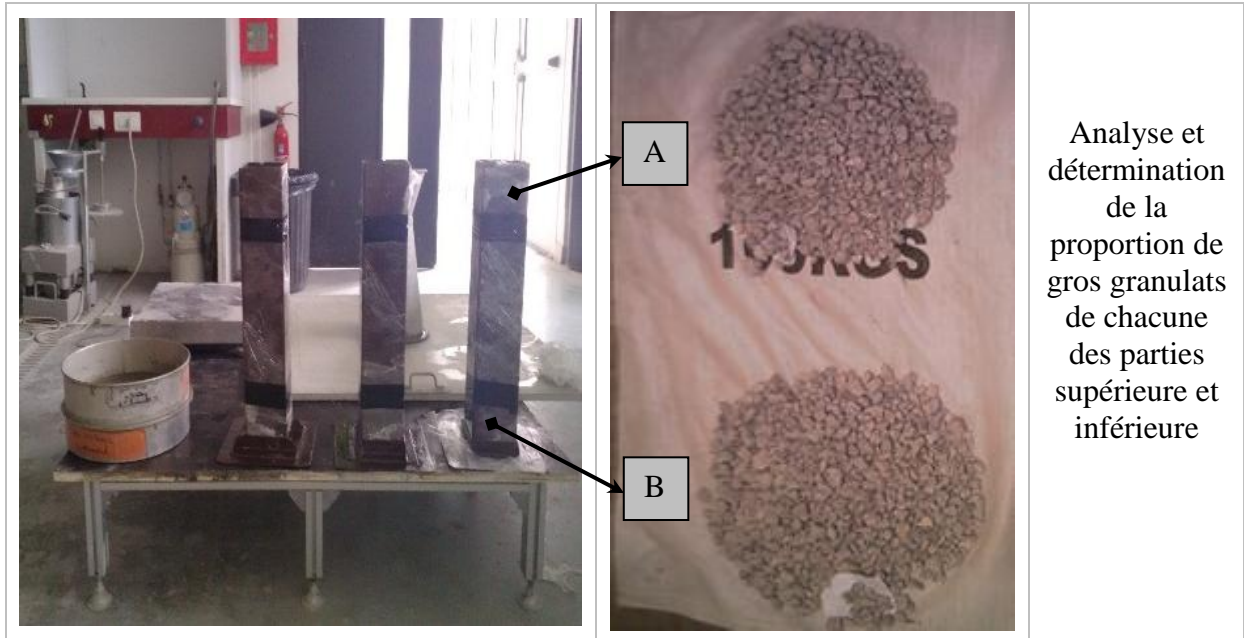


Figure III.2.a- Dispositif de l'essai à la colonne

La taille minimale des granulats analysés est supérieure à 5 mm. Un indice f est déterminé selon l'équation (III.2) avec une précision de $\pm 1\%$ (fig. III.2.b).

$$f = \frac{M_a^A}{M_a^B} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Où M_a^A : masse des gros granulats dans la partie supérieure (retenue sur la taille d'ouverture du tamis de 5 mm).

M_a^B : masse de gros granulats dans la partie inférieure (retenue sur la taille d'ouverture du tamis de 5 mm).

III.1.3- Essais ultrasoniques

Sur la base de la technique précédente de caractérisation de la ségrégation par des essais de stabilité à la colonne [BS 1881 : Part 203], on a procédé à la détermination d'un indice de ségrégation ultrasonore f_u . Cet indice qui est le coefficient ultrasonique de résistance à la ségrégation proposé est donné par l'équation (III.3) avec une précision de $\pm 1\%$ (fig. III.3 a et b).

$$f_u = \frac{V_A}{V_B} \times 100 \quad (III.3)$$

Où : V_A : la vitesse de propagation dans la partie supérieure [A]

V_B : la vitesse de propagation dans la section inférieure [B]

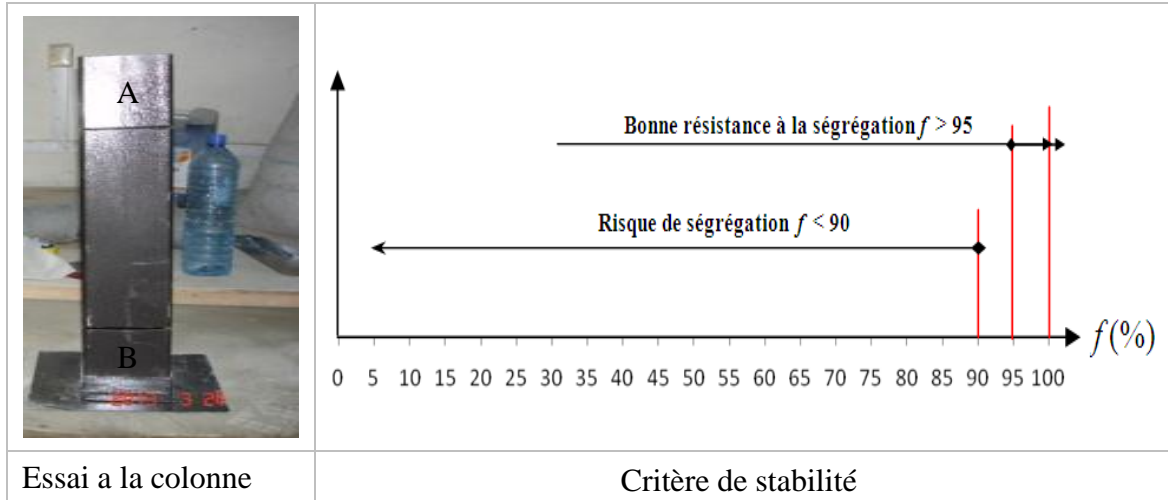


Figure III.2.b- Critère de stabilité de l'essai à la colonne

La vitesse d'impulsion est connue pour être affectée de manière significative par le type et la quantité des granulats [Bullock et Whitehurst 1959, Jones 1962 et Popovics et al 1990].

En général, la vitesse d'impulsion de la pâte de ciment est inférieure à celle du granulats. Selon plusieurs études [Bullock et Whitehurst 1959, Kaplan 1959 et Jones 1962], à un même niveau de résistance, le béton avec des teneurs en granulats plus élevées donne des vitesses d'impulsion plus élevées.

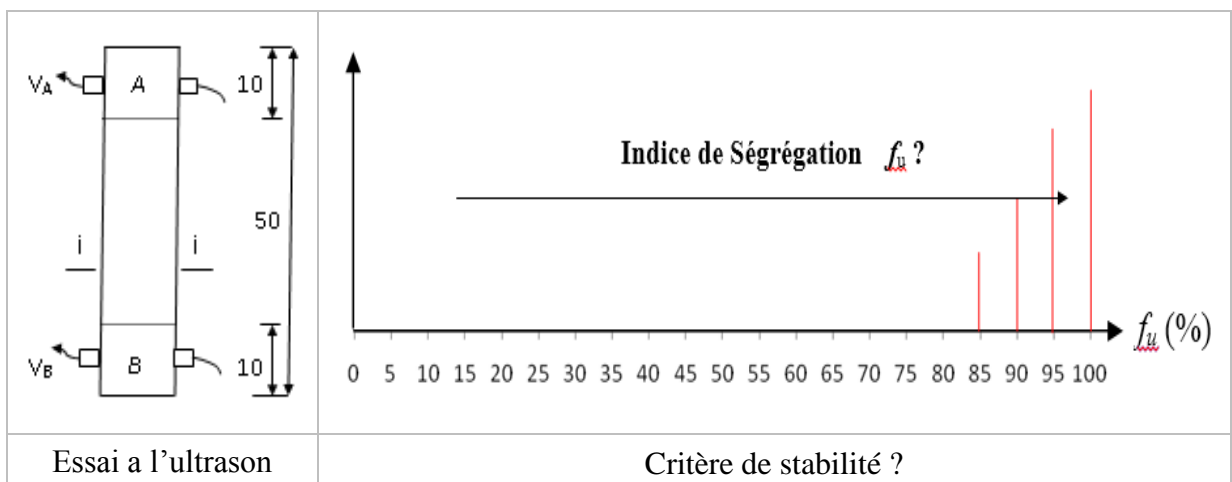


Figure III.3.a- Essais ultrasoniques et critère ultrasonique de stabilité



Figure III.3.b- Dispositif utilisé pour la caractérisation ultrasonique de la ségrégation (LGCH, université de Guelma, Algérie)

Les essais ultrasoniques ont été réalisés en mode direct pour déterminer les vitesses des ondes ultrasonores longitudinales. Ces essais ont été réalisés à l'aide d'un appareil ultrasonique de marque 'Controls' modèle 58 E0049/A, avec une fréquence des impulsions de 54 kHz (fig. III.4).

Les procédures d'essais ont été réalisées selon la norme ISO1920-7 [ISO, 2004].

Le principe de l'essai est que l'impulsion des vibrations longitudinales est produite par un transducteur électro-acoustique (émetteur). Après avoir traversé une longueur de trajet connue dans le béton, les vibrations impulsionnelles sont converties en signaux électriques par un second transducteur «récepteur» [IAEA, 2002]. Les circuits électroniques de temporisation permettent de mesurer le temps de transit de l'impulsion.

Plusieurs compositions de béton sont soumises aux trois types d'essais de caractérisation de la ségrégation, en plus de l'essai d'étalement. La méthode des essais par colonne mesure à la fois la ségrégation et la sédimentation plastique, la sédimentation plastique est affectée par la ségrégation, le ressuage, et le temps de prise. En revanche, la méthode au tamis ne mesure que la ségrégation.

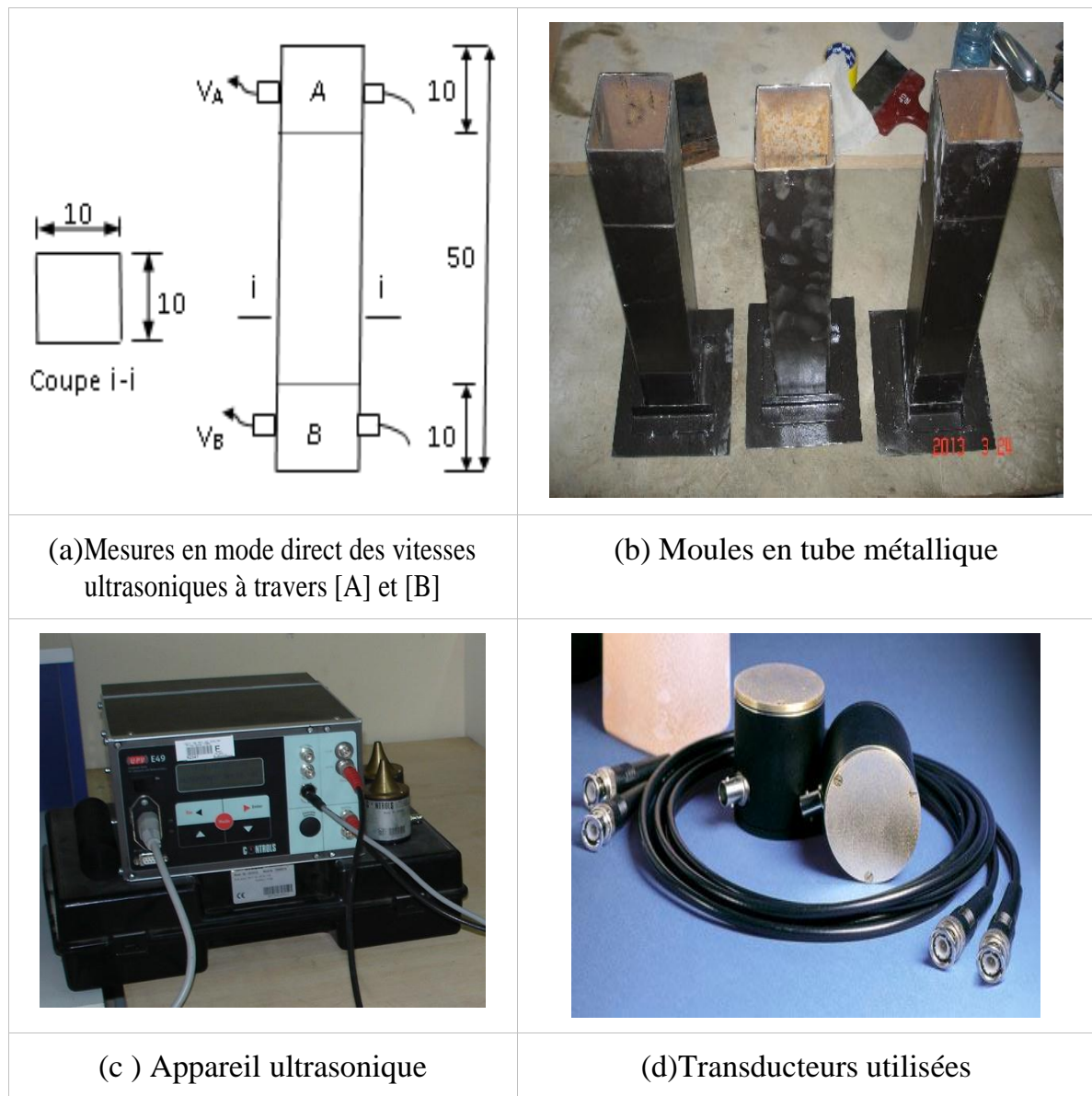


Figure.III.4- Procédure de la détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons " f_u "

III.2- Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont des produits locaux ; ciment portland ordinaire (CEM II-A, 42,50), des fillers calcaires [0/80 μm] pour modifier la viscosité et un super plastifiant à base de poly-carboxylate.

Les granulats fins (sable) avaient une granulométrie maximale de 5 mm, un module de finesse de 2,56 et une densité de 2,53. Les gros granulats (gravier) avaient une taille maximale de 15 mm, une densité de 2,67. Les compositions

chimiques du ciment portland, des fillers et de l'adjuvant sont données par le tableau III.1.

Les distributions granulométriques des fillers calcaires, et des granulats sont présentées par les figures III.5 et III.6.

Tableau III.1- Propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés.

Facteur	Ciment	Fillers	Superplastifiant
CaCO ₃ (%)	-	98.00	-
CaO (%)	55 - 65	56.03	-
SiO ₂ (%)	22 - 28	0.04	-
Al ₂ O ₃ (%)	5 - 6	0.08	-
Fe ₂ O ₃ (%)	3 - 3.6	0.02	-
MgO (%)	1 - 2	0.17	-
K ₂ O (%)	0,3 - 0.6	0.02	-
NaO ₂ (%)	0,1 - 0.16	0.05	-
SO ₃ (%)	1,8 - 2,5	0.0021	-
CaOL (%)	0,8 - 1.8	/	-
cl ⁻	0 - 0.01	0.0033	< 1
Perte au feu (%)	-	43	-
Densité (kg/l)	3.15	2.7	1.2
Blaine (cm ² /g)	3300 - 4000	-	-
Ph	-	9	8.2
Début de prise (mn)	≥ 60	-	-
Fin de prise (mn)	150-250	-	-

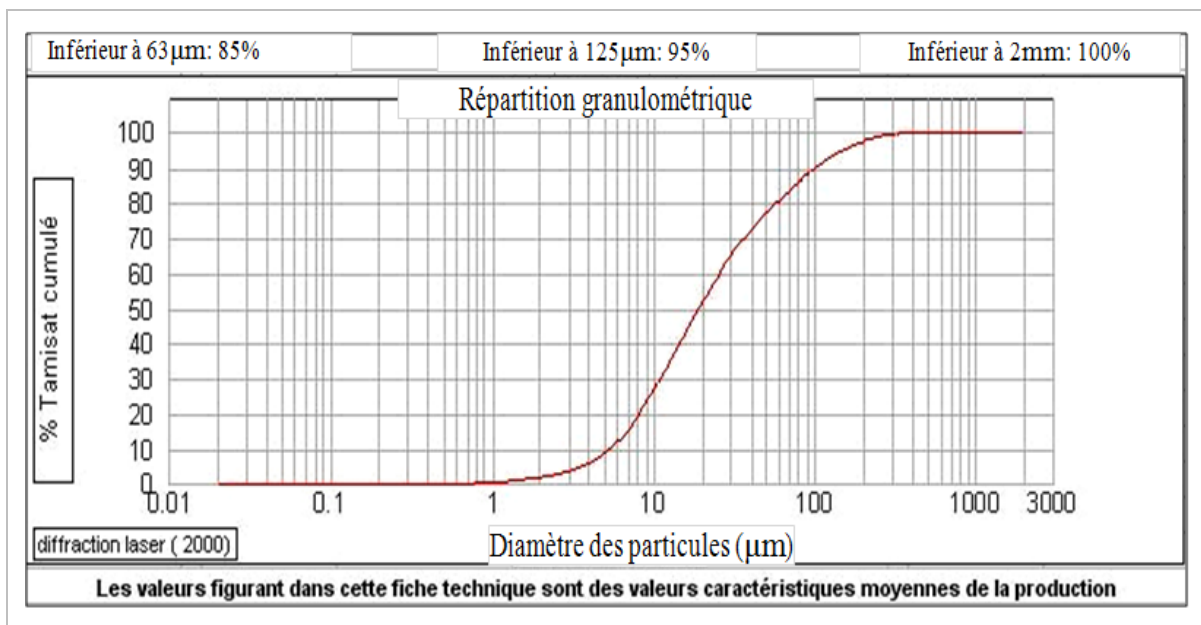


Figure III.5- Courbes granulométriques du filler utilisé ;
Source ENG el khroub [ENG, 2012].

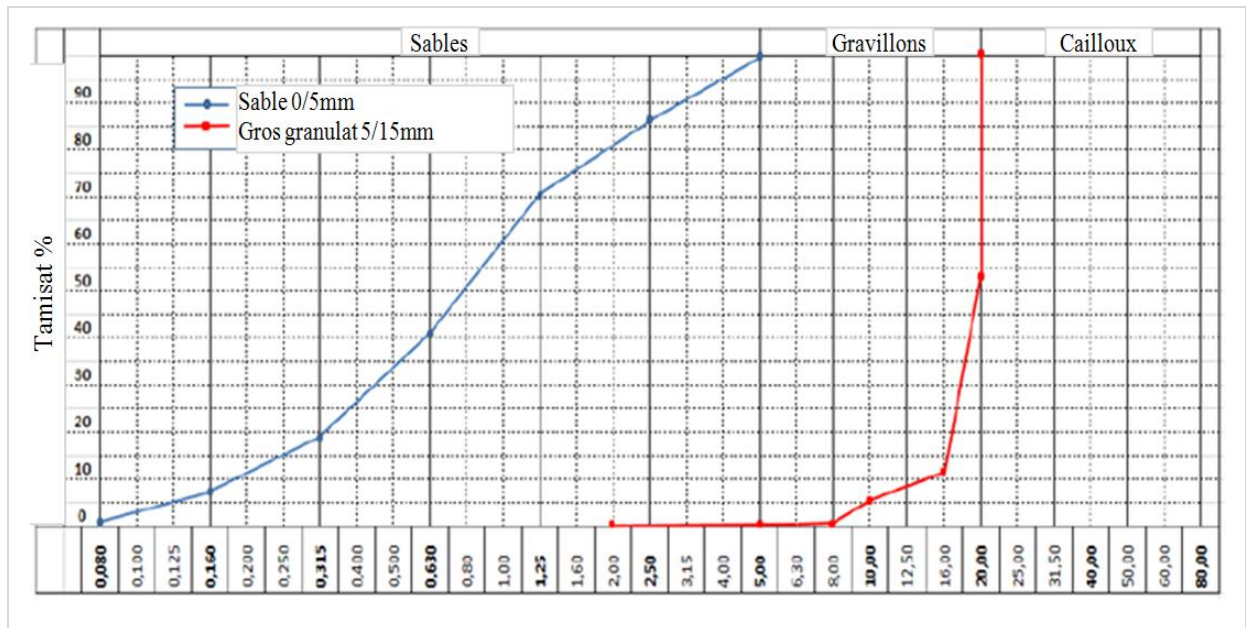


Figure III.6- Courbes granulométriques des granulats utilisés

III.3- Formulation des bétons d'étude

Dans cette section, nous présenterons une étude de la formulation des bétons à base de fillers calcaires comme addition et sans agent de viscosité.

Dans ce travail, on a utilisé une gamme de constituants disponibles localement, en suivant les démarches de la méthode d'Okamura [Okamura et Ouchi 2003].

Nous avons lancé un certain nombre d'investigation, sur les compositions des bétons pour essayer d'adapter la méthode et pour l'obtention de bétons qui répondent aux exigences d'une bonne fluidité et une stabilité accrue.

Les différents constituants utilisés sont :

- ciment du type (CEM II/A, 42.50) de Hajer-Essoud, Skikda.
- des fillers calcaires UF20 (0/80 μm) de la carrière ENG de Khroub,
- des granulats (sable et gravier) de la carrière « SAIPAM » Guelma,
- un super-plastifiant Medaplast SP40 de Granitex,
- L'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'université 8 mai 1945, Guelma.

Toutes les caractéristiques des constituants utilisés sont rassemblées et présentées en annexes.

III.3.1- Détermination des paramètres de formulation

- Le Super-plastifiant

Il est noté que le dosage en super-plastifiant des bétons diminue avec l'augmentation du rapport F/C+F et que la consommation en adjuvant des fillers est inférieure à celle du ciment [Bensebti, 2008]. On peut facilement déduire pour n'importe quelle combinaison Ciment-Fillers, le dosage de saturation en connaissant le dosage de saturation d'un coulis de ciment pur (de l'ordre 1,8 à 2%) et celui de l'ajout (fillers pur, de l'ordre de 0,8%). La relation obéit à la relation suivante :

$$SP = F \times SP_F + C \times SP_C \quad (\text{III.4})$$

Avec :

SP, le dosage de saturation du mélange F+C, SP_F , et SP_C , respectivement les dosages de saturation du coulis de fillers et de ciment, C et F, sont les proportions rapportées à l'unité du ciment et du fillers dans le mélange.

Donc, et afin de réduire le nombre de paramètres lors de l'optimisation de la composition du mortier le dosage en super-plastifiant des bétons étudiés a été fixé au dosage de saturation.

- Les fillers calcaires

Le rapport F/C+F, [Fillers / (Ciment +fillers)] est égal à 0,00 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; et 0,25. Ce dernier qui est généralement dicté par des considérations de résistance ciblée et aussi par les considérations de durabilité.

Pour chaque mélange [filler calcaire + ciment] et un rapport [Eau / (Liant)] il existe un dosage en super-plastifiant (dosage de saturation) au-delà duquel aucun gain de fluidité n'est possible.

- L'eau

La fluidité du liant est très influencée par la quantité d'eau de gâchage, pour cela on a pris le dosage de super-plastifiant (à la saturation du liant) en faisant varier le rapport E/L de 0,32 à 0,48.

Pour optimiser la composition des bétons, on a fixé le dosage en superplastifiant à la saturation puis de ne faire varier que le dosage en eau, si nécessaire, pour obtenir la fluidité voulue. Cette fluidité sera caractérisée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

III.4- Compositions des bétons

Ce travail vise à évaluer l'applicabilité des mesures de vitesse ultrasonore à divers mélanges de béton pour mesurer la ségrégation.

Ainsi, les formulations de béton étaient basées sur les exigences de la méthode japonaise décrites par [Okamura et Ouchi 2003] pour la formulation des bétons auto-plaçant et comme elle est décrite dans l'annexe 1.

III.4.1- Dosage des granulats

Le dosage en fines favorise d'atteindre une porosité minimale du squelette solide. Les résultats présentés sur la courbe granulométrique mettent en évidence ce dosage.

$$V_{Granulats} = 1000 - V_{Pâte} \quad (III.5)$$

Avec $V_{Pâte}$, le volume de pâte : $V_{Pâte} = V_C + V_E + V_F$

Connaissant le volume total absolu des granulats et les pourcentages en volume absolu de sable (S %) et de gravillon (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_S) de gravillon (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S et G) :

$$\begin{aligned} V_{absolu\ sable} &= V_{granulats} \times S \% \\ \rightarrow S &= \frac{V_{absolu\ sable}}{V_{granulats}} \times 100 \end{aligned} \quad (III.6)$$

$$\begin{aligned} V_{absolu\ gravillon} &= V_{granulats} \times G \% \\ \rightarrow G &= \frac{V_{absolu\ gravillon}}{V_{granulats}} \times 100 \end{aligned} \quad (III.7)$$

Avec ρ_s et ρ_G respectivement la masse volumique de sable et de gravillon.

Dans cette étude, le dosage en gravier est fixé à 50 % de sa compacité γ et celui du sable à 40 % du volume total du mortier. Idéalement, le volume de la pâte devrait permettre au béton de circuler, tout en minimisant le coût des matières premières.

$$\text{Compacité : } \gamma = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$$

Avec

ρ_{app} : Masse volumique apparente,

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

III.4.2- Vérification des compositions

En utilisant donc une gamme de constituants disponible, cité en haut, et souvent utilisés localement, nous avons entamé un travail de formulation comme suite :

Au début nous avons formulé trois (03) bétons tels que le rapport (F/C+F) est égal à 0 (F=0) ; 0,13 (F=0,15C) ; et 0,20 (F=0,25C).

Les trois bétons sont présentés dans le tableau.III.3, suivant :

Tableau.III.2- Composition des bétons d'essai

Désignation	Paramètres de formulation			Dosage en Kg/m ³						
	a= F/C+F	b= SP/C+F	d= E/C+F	G	S	C	F	E	SP	Béton (kg)
B1	0,00	2,00	0,48	775	736	500	0,00	240	10	2261
B2	0,13	1,82	0,46	775	736	440	66	231	9,00	2257
B3	0,20	1,70	0,45	775	736	407	102	228	8,67	2257

III.4.2.1- Gâchées d'essais et caractérisation des bétons

Les bétons formulés (présentés dans le tableau III.3), ont été testés pour vérifier si les objectifs visés sont bien atteints. En l'occurrence, un étalement proche de 70 cm. (Selon les prescriptions du Guide Européen pour les bétons auto-plaçant [EFNARC, 2005]). Les essais réalisés pour chaque béton sont :

- L'étalement ;
- L'essai de stabilité au tamis ;
- L'essai à la boîte en L.

On procède par des corrections des compositions pour obtenir l'étalement souhaité (66 cm et plus). Le dosage du sable étant déjà très élevé, les corrections doivent être opérées sur les compositions du coulis. Par conséquent, sur les quantités d'eau et de super plastifiant.

Afin d'ajuster les compositions, nous avons agi par l'augmentation du dosage en eau. Cette augmentation qui se traduit par l'augmentation du rapport $E/C+F$, car

l'augmentation du dosage en super plastifiant ne permet pas de faire augmenter sensiblement l'étalement des bétons [Okamura1995] [Bensabti2008].

Ainsi, nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants. Les résultats des essais obtenus sont :

➤ **Béton B 1 (F =0)**

Tableau III.3-a. Evolution de l'étalement du béton B1

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	T40(S)	OBS
B 1	B							
B1-a	0,00	2,00	0,38	49,00	2,02	0,61	-	✘
B1-b	0,00	2,00	0,40	32,00	-	-	-	✘
B1-c	0,00	2,00	0,45	42,00	-	-	-	✘
B1-d	0,00	2,00	0,48	70,00	17,87	0,80	4,8	✓

➤ **Béton B 2 (F =0.15C)**

Tableau III.3-b. Evolution de l'étalement du béton B2

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	T40(S)	
B2								
B2-a	0,13	1,82	0,75	77,50	23,00	0,69	1,95	✘
B2-b	0,13	1,82	0,53	73,5	13,00	0,80	1,07	✓
B2-c	0,13	1,82	0,46	72.50	8,12	0,70	1,95	✘
B2-d	0,13	1,82	0,43	71,50	16,90	0.75	2.05	✓

➤ **Béton B 3 (F =0.20C)**

Tableau III.3-c. Evolution de l'étalement du béton B3

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	T40(S)	OBS
B3								
B3-a	0,20	1,70	0,40	62,00	6,18	0,66	-	✘
B3-b	0,20	1,70	0,41	71,50	19,40	0,80	2,44	✓
B3-c	0,20	1,70	0,45	73,00	22,40	0,85	1,95	✓
B3-d	0,20	1,70	0,50	75,00	24,70	0,84	1,07	✘

L'ajout d'eau a permis une augmentation de l'étalement. Cependant, il est essentiel de ne pas perdre de vue l'aspect de la cohésion du béton qui doit être vérifié.

On sait que l'augmentation du dosage en eau provoque une diminution de la cohésion au sein du mélange qui peut entraîner des phénomènes de ségrégation très préjudiciables. C'est pour cette raison que nous avons testé, en plus de l'étalement, pour chaque mélange étudié ; la stabilité au tamis, l'essai à la boîte en L et la mesure de la vitesse d'écoulement¹. Ces mesures qui permettent d'apprécier la stabilité et la capacité de remplissage du béton.

En analysant les résultats obtenus, on peut déterminer pour chaque béton (B1 à B3), le béton à retenir. En se référant au «guide Européen pour les bétons Auto-plaçants» [EFNARC, 2005], le béton à retenir est par définition celui qui présente :

- Un étalement proche de 70 cm ;
- Une stabilité au tamis inférieure ou égale à 23% ;
- Un rapport à la boîte en L supérieur à 0,75.

Les paramètres de formulation retenus sont donc rassemblés dans le tableau III.3-d.

Tableau III.3.d-Paramètres de formulation et caractéristiques des bétons corrigées et ajustées.

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	Appellation par la suite
B1= B1-d	0,00	2,00	0,48	70,00	17,87	0,80	C01
B2= B2-d	0,13	1,82	0,43	71,50	16,90	0,75	C06
B3= B3-b	0,20	1,70	0,45	70,00	19,40	0,85	C08

On a procédé de la même façon, pour les autres bétons, avec des corrections des compositions pour obtenir l'étalement souhaité (66 cm et plus).

Ainsi, nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants. Les résultats des essais obtenus sont rassemblés dans les tableaux (III.4 et III.5).

En suivant les recommandations de la méthode japonaise, nous avons formulé des bétons tels que le rapport F/F+C est égal à 0,00 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; et 0,25 et nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants (tab. III.4).

¹Mesure effectuée lors de l'essai d'étalement. C'est la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 40 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 4 et 10 secondes [Hasni, 1999].

Tableau III.4- Dosage en fillers des bétons.

Désignation		Rapport pondéral (Fillers/Ciment)	Rapport pondéral (Fillers/Ciment + Fillers)
		%	%
C01	C09	0	0,00
C02	C10	5	4,76
C03	C11	10	9,09
C04	-	12	10,71
C05	-	14	12,28
C06	C12	16	13,79
C07	-	18	15,25
-	C13	20	16,67
C08	C14	25	20,00

Les compositions des mélanges testés sont présentées dans le tableau III.5.

Tableau III.5- Compositions des mélanges testés.

Béton	Proportions en kg/m ³						a^* =	b^* =	d^* =
	Gravier (5-15 mm)	Sable (0-5 mm)	Ciment (C)	Fillers (F)	Eau (E)	Super- Plastifiant(S_p)	F/L (%)	S_p/L (%)	E/L (%)
C01	775	736	495	0,0	237,8	9,91	0,00	2,00	48
C02	775	736	477	24	235,2	9,71	4,76	1,94	47
C03	775	736	460	46	232,5	9,50	9,09	1,88	46
C04	775	736	457	55	230,2	9,49	10,71	1,86	45
C05	775	736	454	64	227,8	9,48	12,28	1,83	44
C06	775	736	452	72	225,3	9,47	13,79	1,81	43
C07	775	736	450	81	222,8	9,46	15,25	1,78	42
C08	775	736	429	107	219,8	9,11	20,00	1,70	41
C09	775	736	618	0,0	198,0	12,35	0,00	2,00	32
C10	775	736	577	29	200,0	11,76	4,76	1,94	33
C11	775	736	550	55	200,0	11,37	9,09	1,88	33
C12	775	736	528	84	196,0	11,06	13,79	1,81	32
C13	775	736	509	102	195,0	10,75	16,67	1,76	32
C14	775	736	488	122	195,0	10,36	20,00	1,70	33

* [L ; liant, ($a=F/L$) ; taux filler/liant, ($b=S_p/L$) ; taux super-plastifiant/liant, ($d=E/L$) ; taux eau / liant.]

Dans tous les mélanges, la quantité de granulats est maintenue constante, la quantité de super-plastifiant correspond au dosage de saturation du liant (1,7% à 2%) et la quantité des autres constituants est variable : les fillers (0% à 20%), et l'eau (32% à 48%) par rapport aux quantités du liant.

III.5- Procédures des Essais

Tout d'abord, un tamis perforé à trous carrés de 5 mm, d'un diamètre de cadre de 300 mm et d'une hauteur de 40 mm, a été utilisé pour les essais de stabilité au tamis [ISO 2004]. La colonne utilisée pour évaluer la résistance à la ségrégation était un tube carré en acier de 500 mm de hauteur et de 100 x 100 mm de section.

Ce même tube a également été utilisé pour les essais ultrasoniques, où des transducteurs sont fixés à l'extérieur de la colonne d'acier, qui doivent être couplés à la surface par un moyen approprié (par exemple de la graisse) à chacune des deux extrémités (figures III.1. a, b, c et d), [Kumavat et al 2014]. Ces procédures ont été appliquées aux mélanges énumérés dans le tableau III.3.

Les travaux expérimentaux menés sur les mélanges du tableau III.2 ont concerné les procédures suivantes (fig. III.7) :

1. La méthode au tamis en utilisant l'équation (III.1) ;
2. La méthode à la colonne en utilisant l'équation (III.2) ;
3. La méthode à vitesses ultrasoniques proposée en utilisant l'équation (III.3).

III.5.1- Caractérisation des bétons frais

L'auto-plasticité des bétons nécessitent :

1. un étalement compris entre 640 mm et 720 mm, à condition que le béton soit homogène et ne présente aucun signe de saignement (fig. III.8),
2. un rapport H_2 / H_1 supérieur à 0,80 pour la boîte en "L"
3. et un indice de ségrégation π compris entre 0 et 15%.





1 ^{ère} étape	Essais de stabilité au tamis [EFNARC, 2005]		 Dédution des Corrélations
2 ^{ème} étape	Essais ultrasoniques (nouvellement développé)		
3 ^{ème} étape	Essais de stabilité à la colonne [BS 1881, Rooney et al, 2001, Cussigh et al, 2003, et Sonebi, 2005]		

Figure III.7- Procédures de caractérisation de la ségrégation des bétons




		
Preuve d'un halo de mortier et d'un éclat d'eau.	Concentration de gros granulats au centre de la masse de béton et présence d'un halo de mortier.	La masse du béton est homogène et ne présente aucun signe de saignement.

Figure III.8- Evaluation visuelle de la stabilité apparente des bétons

III.5.2- Caractérisation de la ségrégation

Une fois que les mélanges sont prêts, les essais sont immédiatement effectués pour évaluer la résistance à la ségrégation. Cela a été réalisé consécutivement par les essais au tamis, les mesures des vitesses ultrasoniques à travers les deux parties extrêmes de la colonne (vide puis remplie par le béton) et enfin les essais de mesure des masses des gros granulats sur les mêmes bétons testés précédemment.

Pour les essais à la colonne, plusieurs techniques de caractérisation de la ségrégation ont été rapportées dans la littérature [Kumavat et al 2014, Lowke et al 2003]. Dans notre cas, le béton frais a été placé dans un tube (section 100 x 100 mm, hauteur 500 mm). Le béton a été prélevé sur les parties supérieure de la colonne (A = 100 x 100 x 100 mm) et inférieure (B = 100 x 100 x 100 mm).

Après avoir été lavés à travers un tamis, les échantillons ont été analysés pour déterminer la proportion de gros granulats. La résistance à la ségrégation f est exprimée par le rapport entre la masse globale des gros granulats dans la partie supérieure et la masse des gros granulats dans la partie inférieure où le critère d'évaluation de la ségrégation est :

- $f > 0,95$: une bonne résistance à la ségrégation.
- $f < 0,90$: une tendance à la ségrégation.

III.5.3- Mesures des vitesses ultrasoniques

Le coefficient ultrasonique de résistance à la ségrégation proposé est donné par l'équation III.3. La mesure consiste à déterminer le temps de propagation des ondes ultrasonores à travers le béton frais aux deux parties extrêmes ; supérieure (A) et inférieure (B) des échantillons (fig.III.4- a et b). Pour cela, une paire de transducteurs, de 54 kHz, a été utilisée (figures III.4-d) : l'un servant de source (émetteur) et l'autre de récepteur. Selon la norme européenne EN 12504-4 [NF EN, 2005], le mode de transmission directe a été effectué.

III.6- Conclusion

Ce chapitre a été consacré en premier lieu aux procédures expérimentales et qui s'articulent sur des essais comparatifs de la caractérisation de la ségrégation pour différentes compositions de béton. La comparaison concerne deux techniques standards (tamis et colonne) par rapport à un essai non destructif par

le biais d'impulsions ultrasoniques. Les essais ont été réalisés sur des mélanges conçus pour avoir différents niveaux de résistance à la ségrégation.

La deuxième partie est consacrée à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation des bétons et leurs proportions et propriétés physico-chimiques pour atteindre cet objectif.

Les mélanges ont été préparés sans et avec en une addition minérale (fillers calcaires) *F*. La confection des mélanges a été effectuée selon les normes en vigueur.

Après caractérisation des bétons, le chapitre suivant discutera les résultats obtenus et les possibles corrélations entre les divers indices de ségrégation. Ceci pour évaluer la fiabilité de cette méthode non destructive quant à la caractérisation de la ségrégation des bétons par rapport aux méthodes traditionnelles.

Chapitre **III** Méthodologie expérimentale

Chapitre **IV** Synthèse et interprétation
des résultats

Chapitre IV Synthèse et interprétation des résultats

IV.1- Introduction

On présente dans ce chapitre les résultats obtenus lors des essais et leur interprétation pour en tirer des conclusions.

A partir des résultats des essais réalisés on essaye d'établir les relations qui peuvent exister entre les différentes propriétés étudiées.

On prospecte donc l'effet de la composition, se limitant aux seuls rapports E/L et F/L, sur les différents indices de ségrégation. A savoir, l'étalement, la stabilité au tamis, la résistance à la ségrégation ainsi que l'indice ultrasonique de ségrégation proposé par notre étude.

IV.2- Présentation des résultats

Les résultats des différents essais de caractérisation réalisés sur les bétons confectionnés sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1- Les différents indices de ségrégation des bétons

Béton	a=	b=	d=	Diamètre	Indice	Indice	Indice
	F/L	SP/L	E/L	d'étalement	à l'ultrason	à la Colonne	au tamis
	(%)	(%)	(%)	S_f (cm)	$f_u=V_A/V_B$ (%)	$f=A/B$ (%)	π (%)
C1	0,00	2,00	48	70,50±1,00	90,80 ± 3,52	58,30 ± 0,10	24,08
C2	4,76	1,94	47	71,50±1,00	90,70 ± 0,40	59,80 ± 4,30	16,49
C3	9,09	1,88	46	73,50±1,20	88,20 ± 1,82	53,60 ± 5,10	16,84
C4	10,71	1,86	45	78,00±1,40	88,60 ± 0,83	52,00 ± 4,20	16,12
C5	12,28	1,83	44	71,00 ± 1,00	89,50 ± 0,52	46,10 ± 4,60	16,08
C6	13,79	1,81	43	71,50 ± 0,80	87,20 ± 1,24	58,50 ± 3,80	16,91
C7	15,25	1,78	42	75,50 ± 0,80	87,20 ± 2,34	57,40 ± 1,80	16,23
C8	20,00	1,70	41	71,00 ± 0,70	84,10 ± 0,29	47,70 ± 2,80	23,53
C9	0,00	2,00	32	69,00 ± 0,10	99,80 ± 0,02	95,30 ± 0,70	6,60
C10	4,76	1,94	33	70,50 ± 0,50	99,50 ± 0,33	95,20 ± 0,20	6,35
C11	9,09	1,88	33	67,00 ± 0,30	99,80 ± 0,23	95,10 ± 0,50	3,30
C12	13,79	1,81	32	71,00 ± 0,60	99,90 ± 0,02	95,10 ± 2,20	8,90
C13	16,67	1,76	32	61,50 ± 0,30	99,90 ± 0,08	96,40 ± 1,60	4,67
C14	20,00	1,70	33	71,50 ± 0,10	99,00 ± 0,64	95,30 ± 2,50	11,45

IV.2.1- L'ouvrabilité

La caractérisation à l'état frais des bétons auto-plaçants (BAP) se fait par les essais recommandés par l'Association Française de Génie Civil. [l'AFGC 2000], à savoir l'étalement au cône, l'écoulement à la boîte en « L » et la stabilité au tamis.

L'utilisation d'un BAP demande de valider ces trois essais pour son auto-plasticité (alors pour le béton ordinaire, on se limite au seul essai d'affaissement pour son ouvrabilité).

Donc l'étude de l'ouvrabilité du béton frais ne peut être envisagée sans prendre en considération les phénomènes de fluidité et de risque de blocage qui interviennent lors de la mise en place de ce matériau. On se limite dans ce paragraphe à la seule discussion de l'évolution de l'étalement au cône d'Abrams. Tous les bétons étudiés ici présentent un d'affaissement supérieur à 60cm. Ces bétons présentent une fluidité acceptable, donc on s'est affranchi de les tester au L-box (la capacité de passage du béton) car notre objectif est le problème de la caractérisation de la ségrégation.

Les valeurs de l'étalement pour les différents bétons obtenues immédiatement après le processus de malaxage sont présentées sur la fig. IV.1.

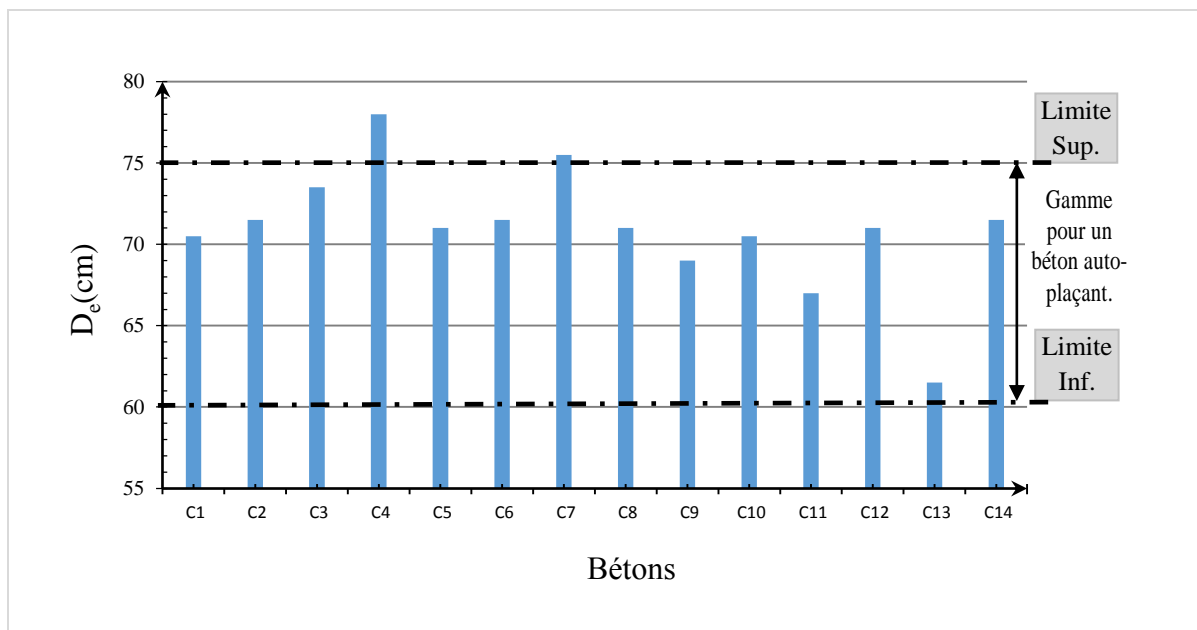


Figure IV.1- Diamètres d'étalement (D_e) des différents bétons.

Les résultats des essais d'étalement de quelques bétons (C4 et C7) dépassent légèrement la valeur supérieure autorisée. Les lignes directrices européennes [Testing-SCC, 2005] suggèrent une valeur de diamètre d'étalement allant de 60 à

75cm pour un béton auto-plaçant. A plus de 75cm, le béton pourrait se séparer, et à moins de 60cm, le béton pourrait avoir une fluidité insuffisante pour traverser un ferrailage très condensé. Tous les bétons étudiés ici présentaient un écoulement d'affaissement supérieur à 60cm. Ces bétons présentent une fluidité acceptable sans risque de blocage.

IV.2.2- L'indice de la ségrégation au tamis

Pour les bétons C1 à C8, la stabilité au tamis est entre 15 et 30% (tab IV.2 et fig. IV.2-a), cette stabilité est jugée critique.

Tableau IV.2- Résultats des essais de stabilité au tamis.

Béton	π (%)
C1	24,08
C2	16,49
C3	16,84
C4	16,12
C5	16,08
C6	16,91
C7	16,23
C8	23,53
C9	06,60
C10	06,35
C11	03,30
C12	8,90
C13	04,67
C14	11,45

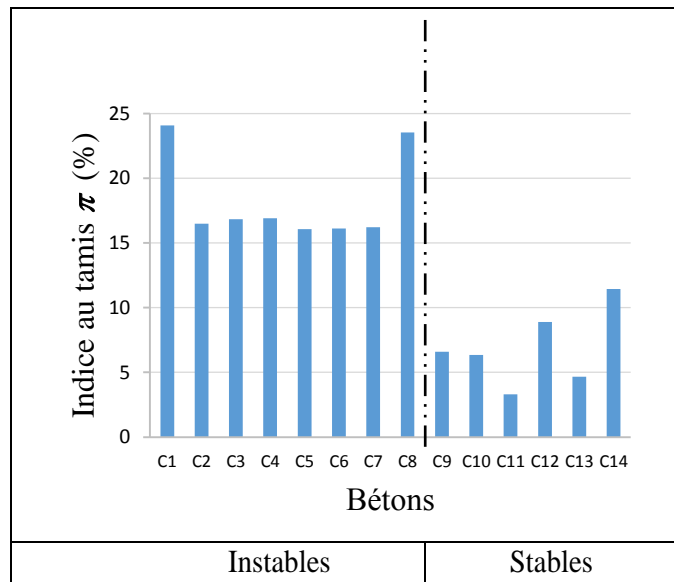


Figure IV.2-a. Indices de stabilité au tamis (π)

Chacun des mélanges C1 à C8 s'est révélé instable, l'indice de ségrégation au tamis π dépasse les 15%. Pour les bétons stables (C9 à C14), cet indice variait de 3,30% à 11,45%.

IV.2.3- L'indice de ségrégation à la colonne

De même pour les bétons C1 à C8, la stabilité à la colonne est entre 45 et 65% (fig. IV.2-b), la stabilité est aussi jugée critique.

Les essais à la colonne (tab IV.3 et fig. IV.2-b) montrent que la masse des gros granulats est restée presque constante dans le cas des bétons stables (C9 à C14).

Pour ces bétons, la moyenne des écarts type était de 0,95% et ne variait que de 0,2% à 2,50%. Pour les bétons instables (C1 à C8) on a un ordre de grandeur plus élevé. La moyenne des écarts type est plus importante (1,68%) impliquant une grande variation de l'évolution du mouvement des gros granulats. L'indice de ségrégation à la colonne varie de 95,10% à 96,40% pour les bétons stables et celui des bétons instables de 46,10% à 64,30%.

Tableau IV.3- Résultats des essais de ségrégation à la colonne

Mixture	Top part -A-	Top part -B-	$f(\%)$
C1	0,46	0,78	58,30
C2	0,51	0,80	64,30
C3	0,43	0,80	53,60
C4	0,40	0,75	52,00
C5	0,44	0,95	46,10
C6	0,55	0,96	58,50
C7	0,49	0,86	57,40
C8	0,40	0,84	47,70
C9	0,71	0,74	95,30
C10	0,79	0,83	95,20
C11	0,75	0,79	95,10
C12	0,85	0,89	95,10
C13	0,71	0,73	96,40
C14	0,71	0,74	95,30

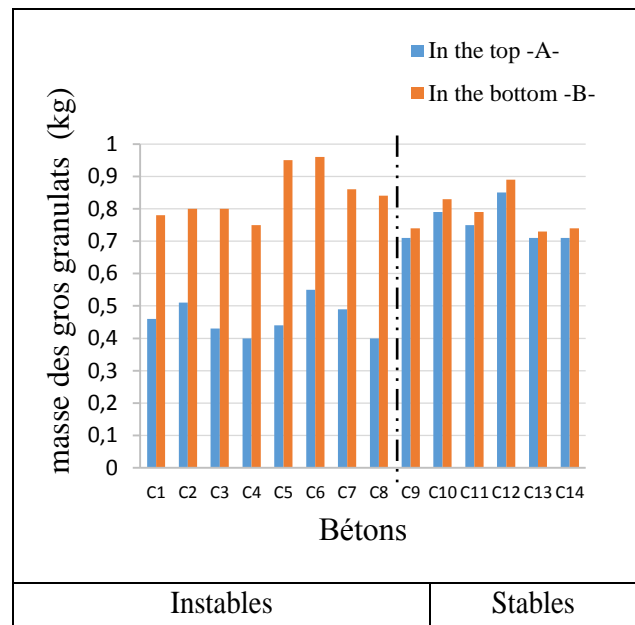


Figure IV.2-b Masses des gros granulats des différentes parties de la colonne.

IV.2.4- L'indice ultrasonique de ségrégation

Les résultats de l'indice ultrasonore de ségrégation sont exprimés par le rapport de la vitesse ultrasonore à travers la partie supérieure par celle à travers la partie inférieure B. Les bétons C1 à C8 ont un indice ultrasonique variant entre 80% et 92% (fig. IV.2-c).

La vitesse ultrasonique reste presque constante dans le cas des mélanges stables (C9 à C14) (tab IV.2 et figure IV.2-c). Les vitesses varient entre 2533m/s et 2591m/s dans la partie supérieure et entre 2557 m/s et 2597 m/s dans la partie inférieure. Pour ces bétons, la moyenne des écarts type était de 0,24% alors que pour les bétons instables (C1 à C8), la moyenne des écarts type est de 1,12%. Ceci s'est reflété par des indices ultrasoniques variant entre 84,10% et 90,80% pour les bétons instables et entre 99% et 99,9% pour les bétons stables.

Tableau IV.4- Résultats des essais ultrasoniques

Béton	V _A (m/s)	V _B (m/s)	f _u (%)
C1	2199	2421	90,80
C2	2281	2515	90,70
C3	2234	2533	88,20
C4	2233	2520	88,60
C5	2232	2493	89,50
C6	2193	2514	87,20
C7	2132	2444	87,20
C8	2133	2536	84,10
C9	2560	2565	99,80
C10	2567	2580	99,50
C11	2591	2597	99,80
C12	2560	2561	99,90
C13	2559	2561	99,90
C14	2533	2557	99,00

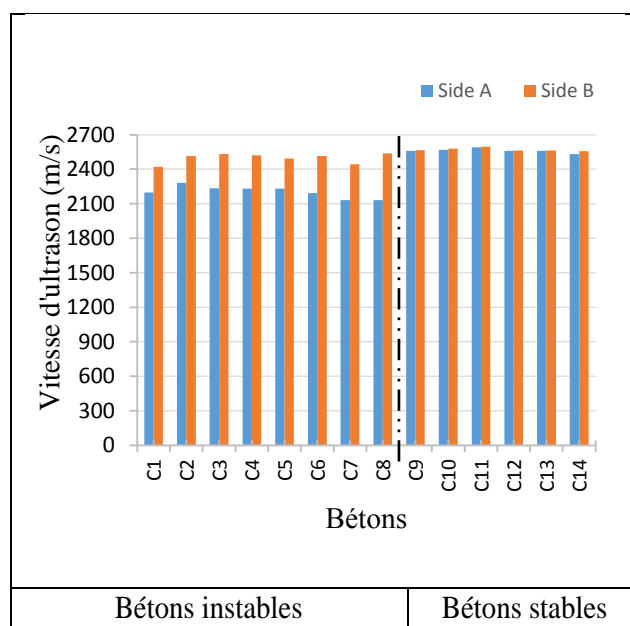


Figure IV.2-c. Vitesses ultrasoniques à travers les deux parties de la colonne

IV.2.5- Conclusion

On remarque clairement la formation de deux groupes des bétons, un groupe de bétons instables (C1-C8) et un autre de bétons stables (C9-C14) du point de vue ségrégation (fig. IV.3). Ce groupage se retrouve aussi vis-à-vis de la caractérisation non destructive par les ultrasons ($60\text{mm} < D_e < 75\text{mm}$, $\pi < 15\%$, $f > 95\%$ et $f_u > 98\%$) comme l'indique la figure IV.3. Ceci implique que cette technique reflète bien l'état de la distribution des granulats dans les bétons. Elle peut s'avérer une alternative aux autres essais de caractérisation de la ségrégation.

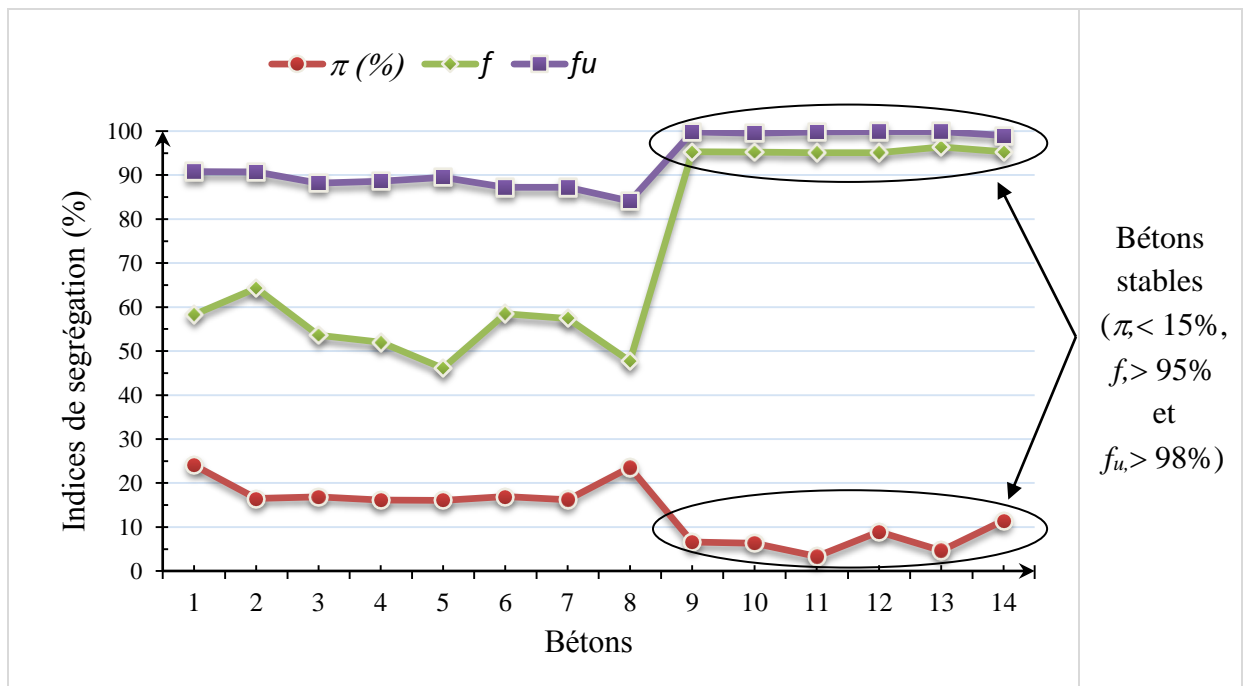


Figure IV.3- Indices de ségrégation des différents bétons (tamis, colonne et ultrason)

IV.3- Effet de la composition sur les indices de ségrégation des bétons

Plusieurs caractéristiques des bétons ont été mesurées et les influences de certains paramètres par rapport au liant (qui est souvent une combinaison de ciment et d'additions fines) tels que, E/L et F/L, ont été appréciées.

IV.3.1- Effet du rapport E/L

La fluidité du liant est très influencée par la quantité d'eau de gâchage et bien sûr par le dosage en super-plastifiant. Le dosage en super-plastifiant est fixé à son dosage à la saturation, on a fait varier le rapport E/L de 0,32 à 0,48. L'étalement le plus faible ($D_e = 61,5$ cm) correspond au plus faible rapport E/L (0,32). Selon les figures IV.4-b, c, d, il est à noter que le risque de ségrégation estimé à partir de trois essais, commence à devenir important quand le rapport E/L dépasse les 40%.

A travers la figure IV.4-a, on constate qu'une diminution du rapport E/L de 33%, pour les bétons sans fillers (C9, C1), conduit à une faible diminution de l'étalement (moins de 3%). Alors de Benhamou [Benhamou, 2008] note des diminutions de 13 % et 16 % de l'étalement respectivement pour des diminutions des rapports E/C de 20 % et 50%. Ceci s'explique par l'effet prédominant du plastifiant qui a été utilisé dans nos bétons.

Les bétons avec fillers (par exemple C8 et C14), présentent aussi une variation minimale de leurs étalements avec l'évolution du rapport E/L, toujours expliquée par la même raison.

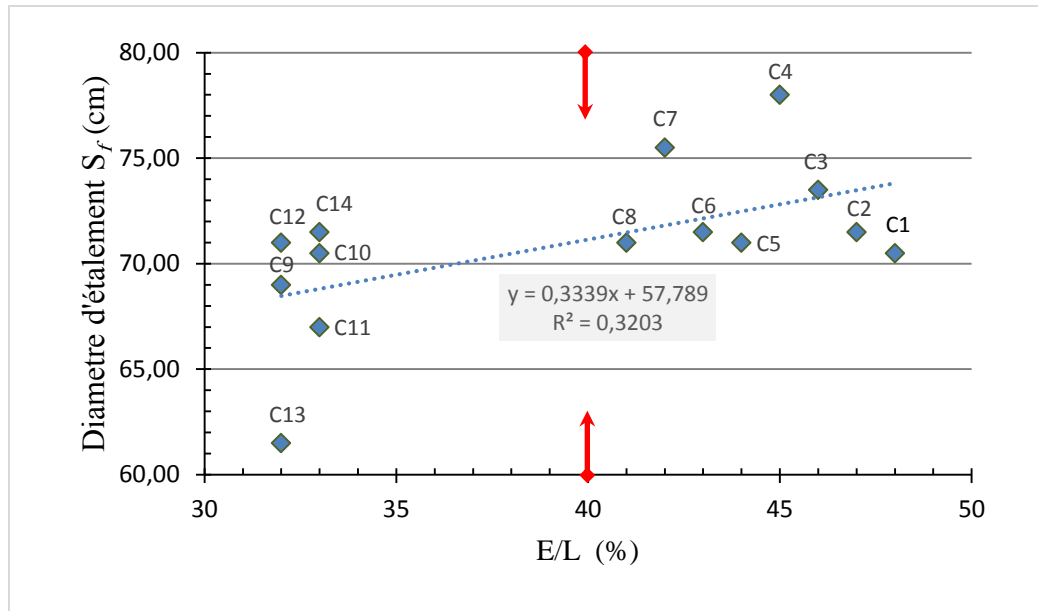


Figure IV.4.a- Evolution de l'étalement en fonction du rapport E/L .

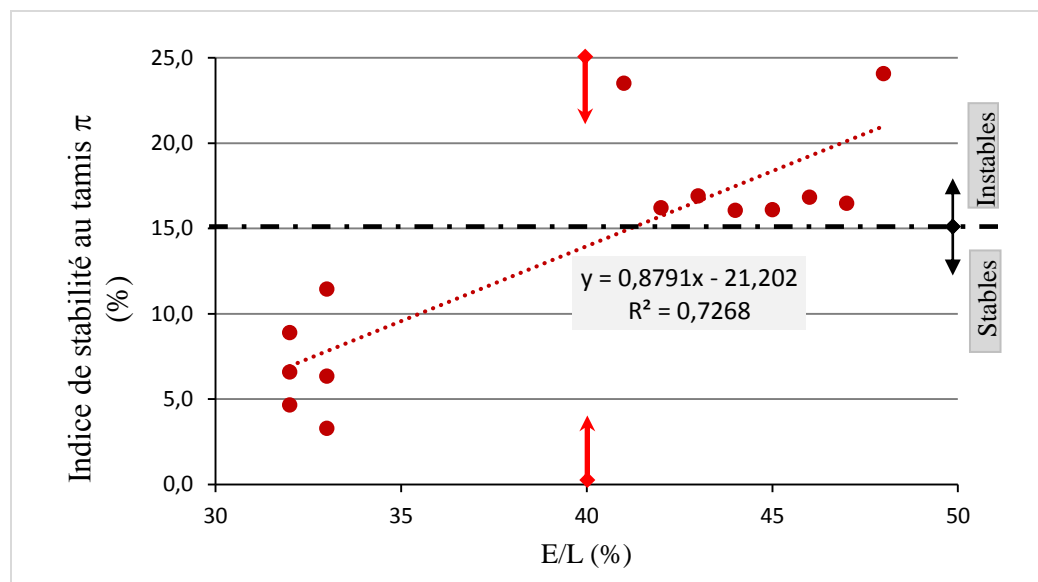


Figure IV.4.b- Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport E/L .

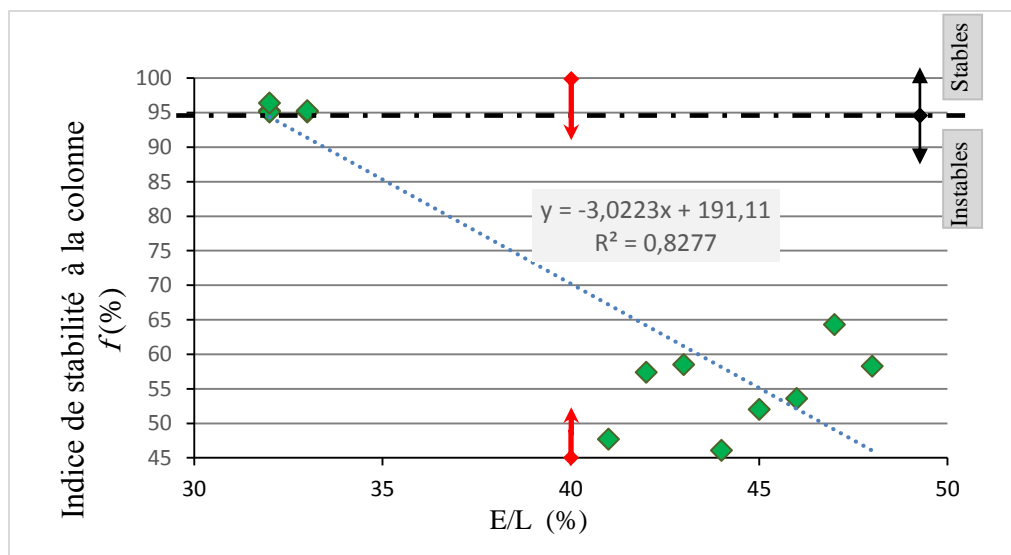


Figure IV.4-c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport E/L .

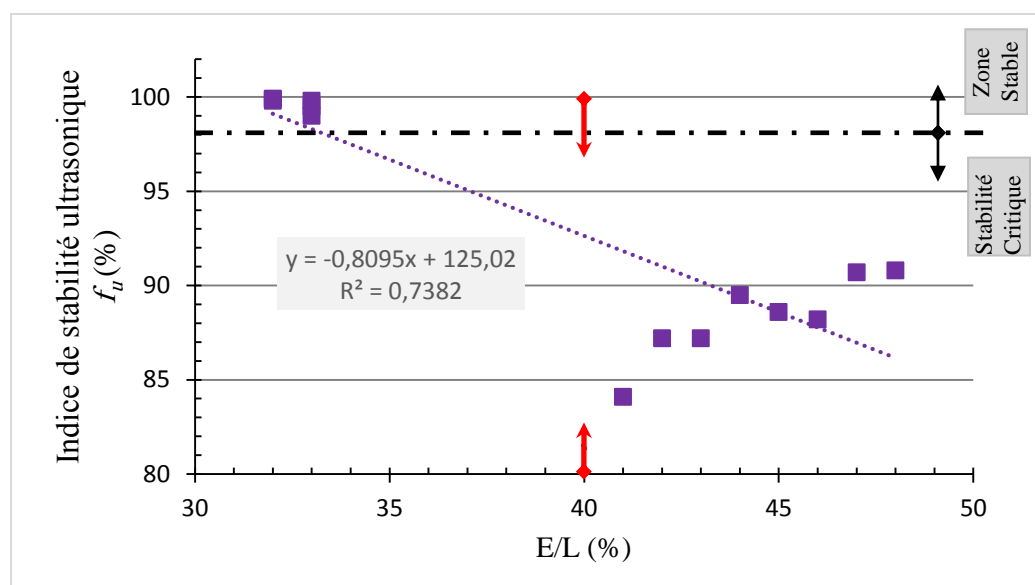


Figure IV.4-d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport E/L .

L'augmentation du rapport E/L provoque en général une augmentation de manière significative de la fluidité du béton en réduisant la viscosité de la matrice du mortier. Elle réduit aussi la capacité de maintenir une distribution uniforme des gros granulats dans cette matrice (Hernandez, 2016).

Les figures (IV.4-b, IV.4-c et IV.4-d) présentent les évolutions des indices de ségrégation, obtenus pour les trois essais de ségrégation des bétons, en fonction du rapport eau-liant (E/L).

En général, l'augmentation du rapport E/L a conduit à une augmentation de l'indice de stabilité au tamis et à une diminution de ceux de la colonne et des ultrasons pour les 14 compositions de béton. La non ségrégabilité des bétons par les trois indices simultanément est obtenue pour des rapports E/L inférieurs à 0,33 ($f_u > 0,98$, $f > 0,95$ et $\pi < 0,15$). Des rapports E/L supérieurs à 0,40 conduisent à une ségrégation des bétons pour chacun des indices ($f_u < 0,98$, $f < 0,95$ et $\pi > 0,15$). Les indices de ségrégation présentent une certaine fluctuation dans leurs évolutions pour le cas des bétons ségrégables, surtout en ce qui concerne les indices de stabilité au tamis et ceux de la colonne (fig. IV.5).

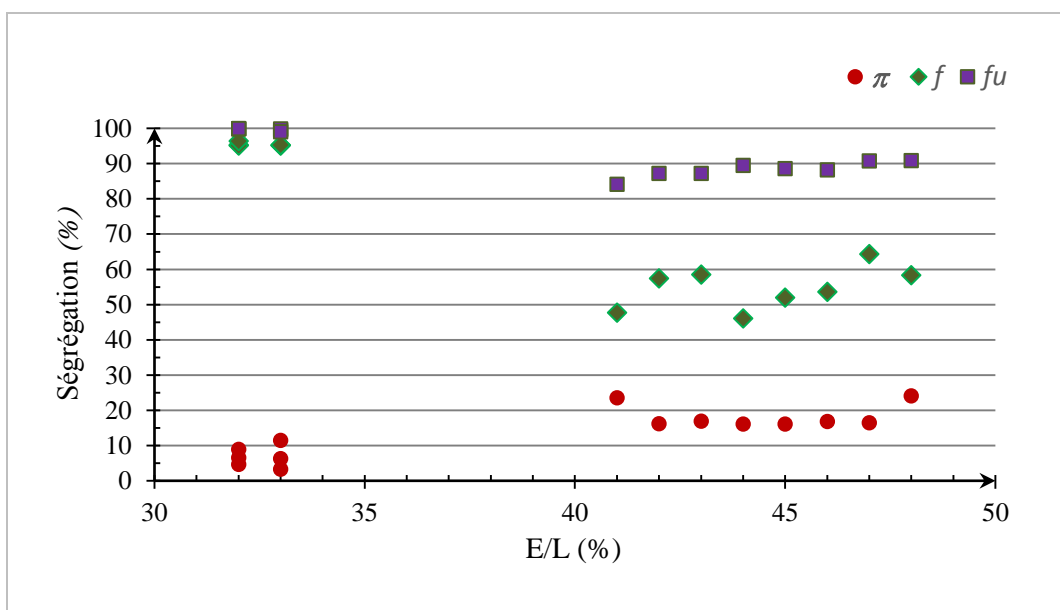


Figure IV.5- Evolution des indices de ségrégation (f_u , f et π) avec le rapport E/L.

La ségrégation est apparue dans les trois types d'essais avec des rapports E/L supérieurs à 0,32. Une diminution de ce dernier rapport de 19,51% (C8, C14) a provoqué une diminution des indices de ségrégation au tamis π de 51,33% et une augmentation de f et f_u respectivement de 99,79% et 17,71%.

IV.3.2- Effet de du rapport F/L

Les variations de l'étalement restent relativement faibles malgré l'augmentation de 20% du rapport F/L entre les bétons C9 et C14 (moins de 4% d'augmentation de l'étalement). Alors que des études ont établi que les fines calcaires augmentent l'ouvrabilité des BAP frais (Ghezal et al. 2002). Ceci est dû à la présence de dosages en super-plastifiant voisins. La présence des fillers aune

forte incidence sur la quantité de super-plastifiant pour un étalement donné (Hanaa, 2017). Les résultats de Zhu et Gibbs (Zhu, 2000) montrent que plus, il ya de fillers moins il faut de super-plastifiant pour atteindre un étalement donné. Même si les fillers calcaires améliorent l'ouvrabilité des bétons en modifiant la structure du squelette granulaire par amélioration de la capacité d'empilement des particules fines par un effet granulaire, l'effet du super-plastifiant a dominé dans notre cas (Figure IV.6-a).

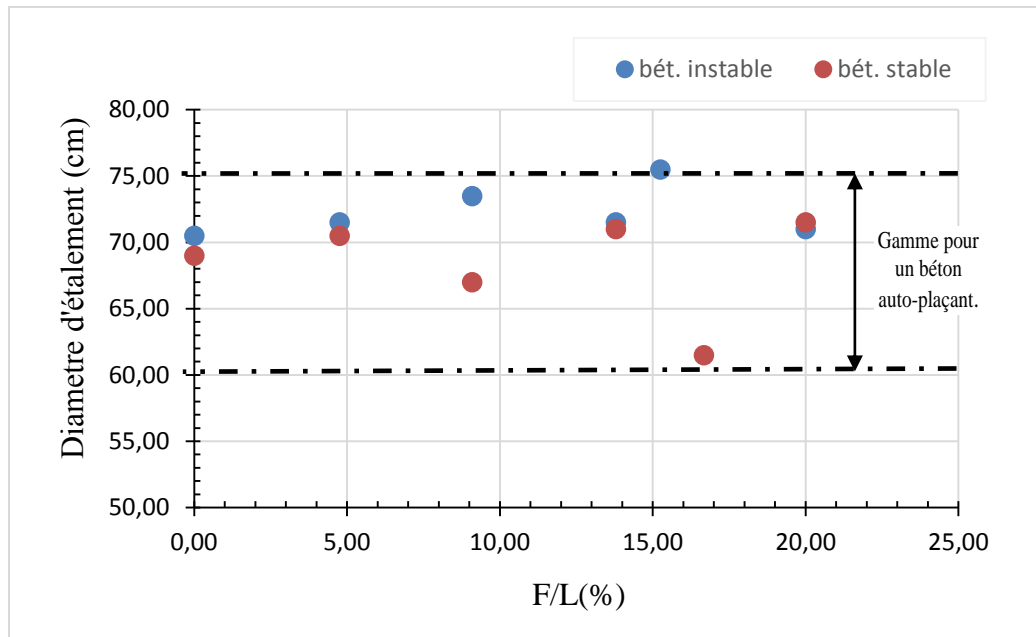


Figure IV.6-a. Evolution de l'étalement en fonction du rapport F/L.

La stabilité au tamis est meilleure pour des bétons contenant plus de fillers présentant des rapports SP/L et E/L voisins, aussi bien pour les bétons instables que les bétons stables. Il est observé la même tendance de variation de la stabilité au tamis pour les deux types de bétons. Une augmentation de F/L de 5% se traduit par une diminution de l'indice de stabilité au tamis π de 31% (C1 et C2) par exemple mais cette évolution présente une fluctuation (Figure IV.6-b).

On observe aussi que l'indice de ségrégation à la colonne f des bétons stables est moins sensible au rapport F/L que celui des bétons instables. Une augmentation de plus de 15 % de F/L n'a presque pas d'effet sur les bétons stables alors qu'elle provoque une diminution de cet indice de plus de 16 % pour les bétons instables. Mais la tendance d'évolution reste la même pour les deux types de béton (Figure IV.6-c).

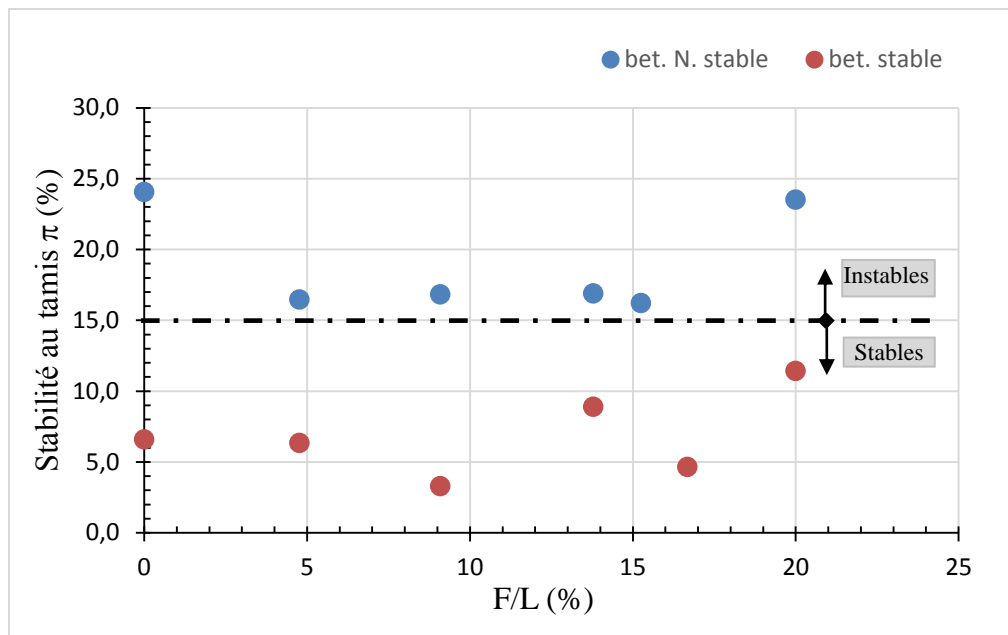


Figure IV.6-b. Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport F/L .

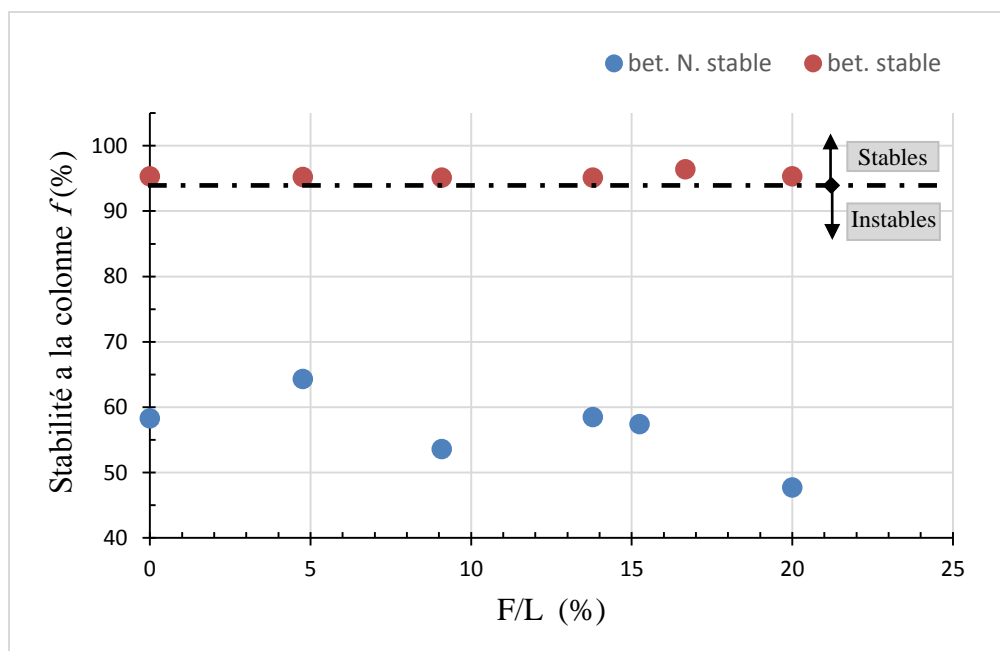


Figure IV.6-c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport F/L .

L'indice ultrasonique de ségrégation f_u des bétons instables (C1 à C8) est plus sensible à la variation du rapport F/L (une diminution voisine de 7% de f_u pour une augmentation de 15% de F/L) que les bétons stables (C9 à C14), une

diminution de moins de 1 % de f_u pour la même augmentation du rapport F/L (Figure IV.6-d).

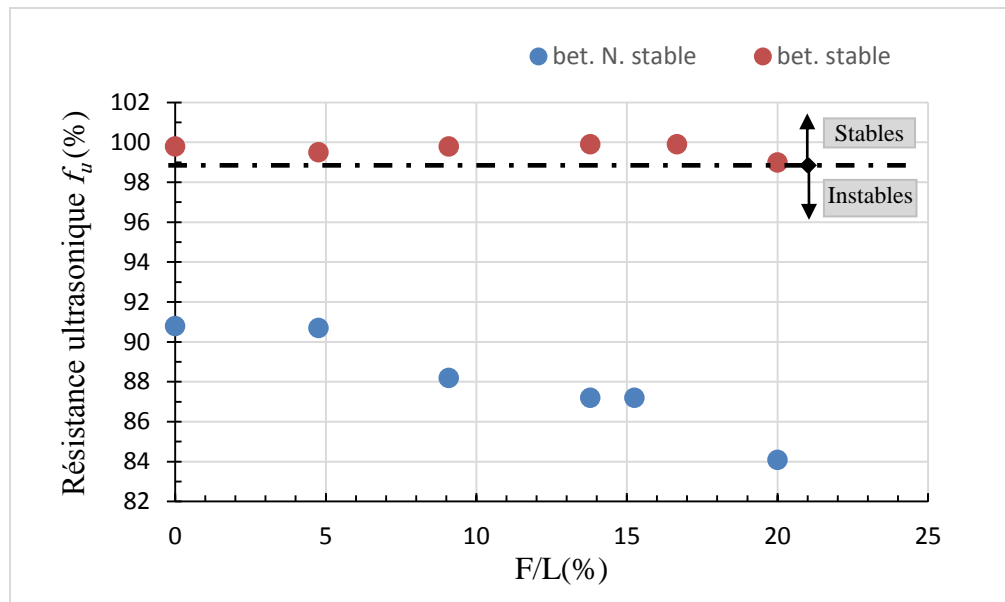


Figure IV.6-d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport F/L.

La figure IV.7 montre l'évolution des trois indices de ségrégation (π , f et f_u) avec le rapport F/L pour les deux types bétons.

Le coefficient ultrasonique f_u est moins sensible à la variation de la quantité de fines dans le béton que l'indice de ségrégation à la colonne f , en particulier pour les bétons stables. En effet, les vitesses ultrasoniques ont été déterminées à travers le béton (mortier et gravier), alors que l'indice de ségrégation de résistance f ne concerne que le gravier.

Ces résultats confirment les résultats obtenus par Benaïcha (benaïcha et al. 2015) qui montrent que la vitesse des ultrasons reste presque constante lorsque la stabilité du tamis ne dépasse pas 20%. Au-delà de cette limite de stabilité, la vitesse des ultrasons varie de manière arbitraire. La vitesse des ultrasons semble être un indicateur sensible de la ségrégation. Une variation très minime de cette vitesse entre les parties indique la présence d'une ségrégation.

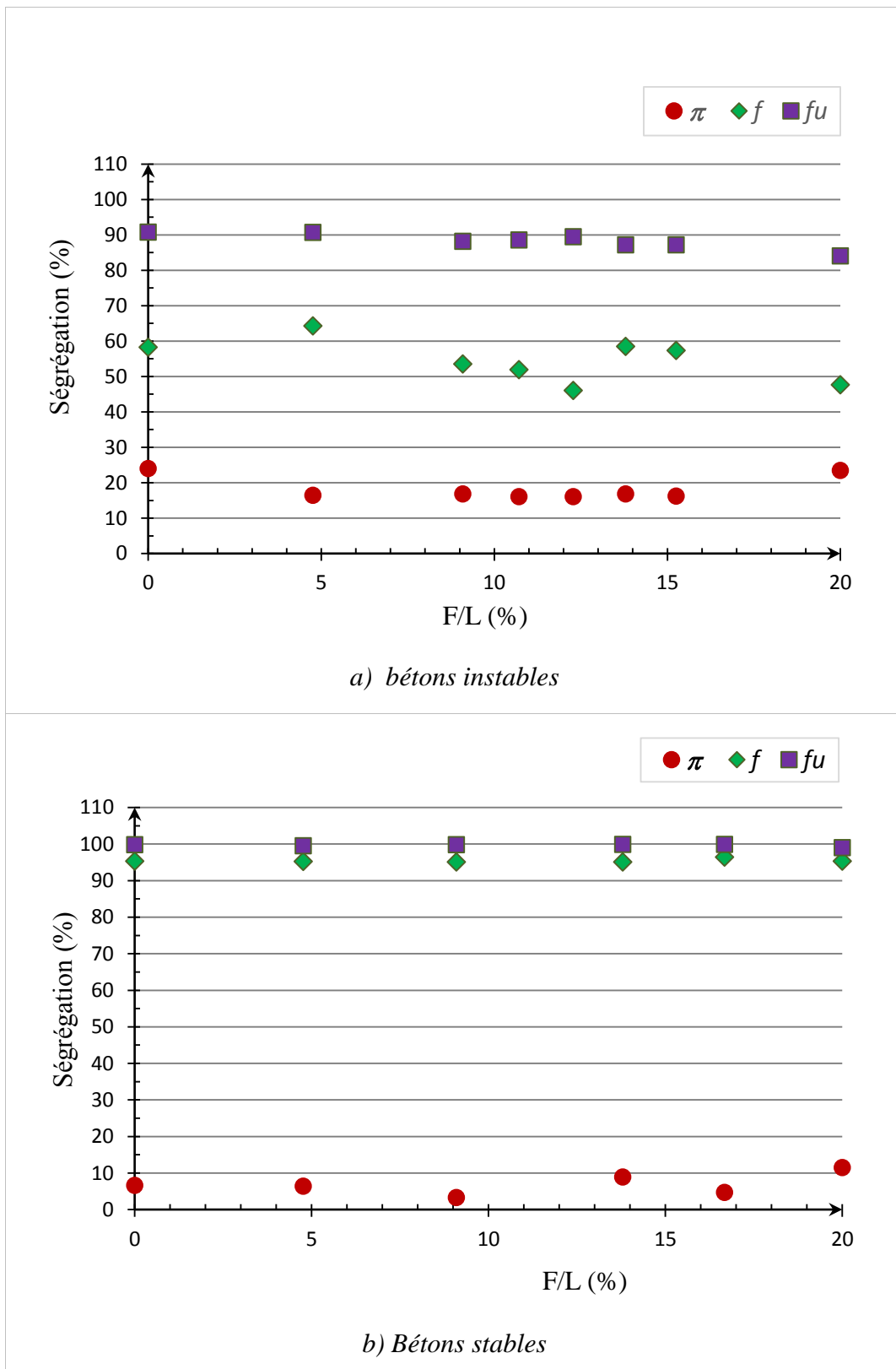


Figure IV.7- Evolution des indices de ségrégation (π , f et f_u) avec le rapport F/L.

IV.4- Relations entre l'étalement et les indices de ségrégation

Les figures (IV.8, a, b et c), présentent les variations du diamètre d'affaissement en fonction de la ségrégation obtenue par les trois types d'essais de la ségrégation pour tous les mélanges. On peut constater que l'augmentation du diamètre moyen d'affaissement des bétons instables par rapport aux bétons stables de 6,44%, a entraîné une augmentation moyenne de l'indice stabilité au tamis de 11,41% et des diminutions moyennes des indices de stabilité à la colonne et ultrasonique respectivement de 36,16% et 11,36%.

Donc, on ne peut avancer des relations bien définies entre l'étalement et les indices de ségrégation de nos bétons mais plutôt des tendances. La fluidité et la stabilité sont des propriétés apparemment contradictoires comme l'a noté Bethmont (Bethmont 2005). La formulation des compositions pour obtenir des bétons auto-plaçants est donc relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis.

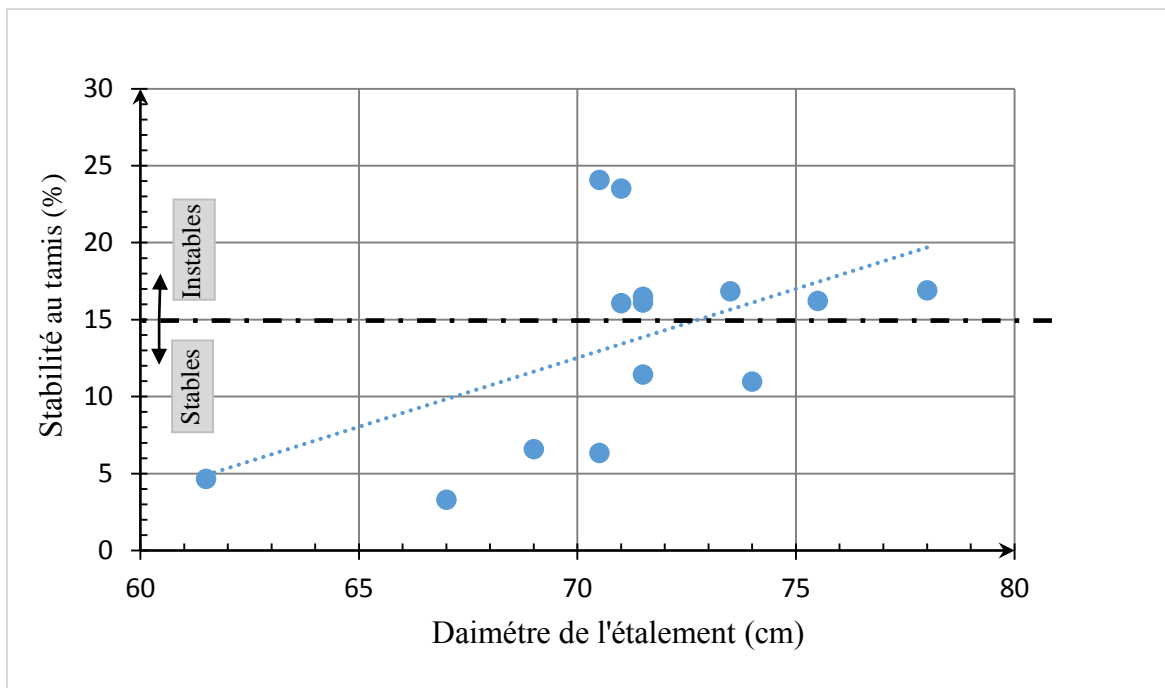


Figure IV.8-a. Evolution de l'indice de stabilité au tamis en fonction du diamètre de l'étalement.

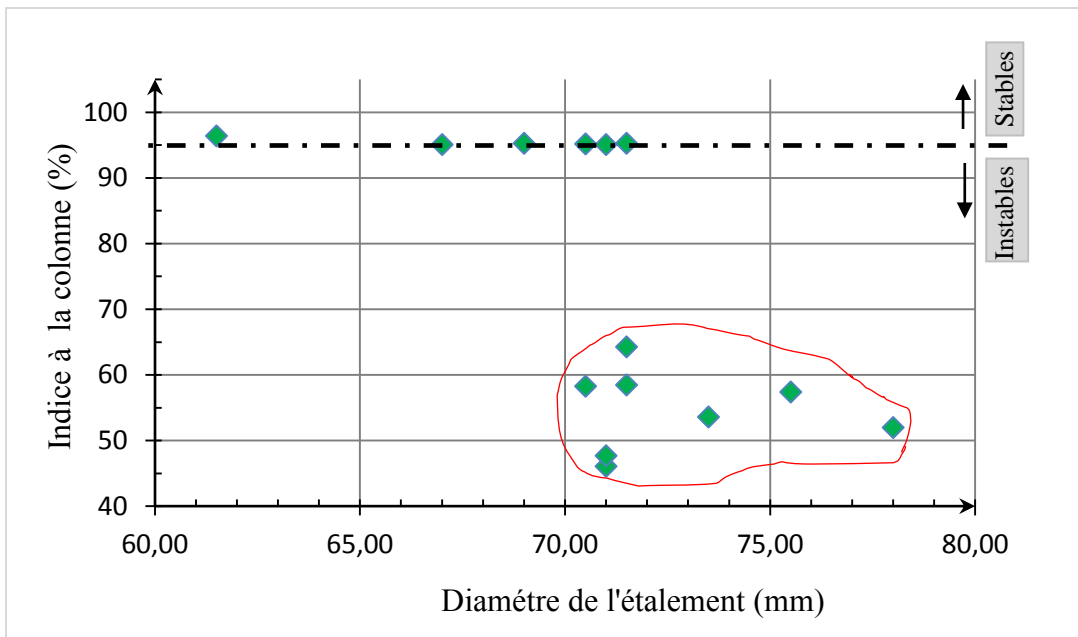


Figure IV.8-b. Evolution de l'indice de ségrégation à la colonne en fonction du diamètre de l'étalement.

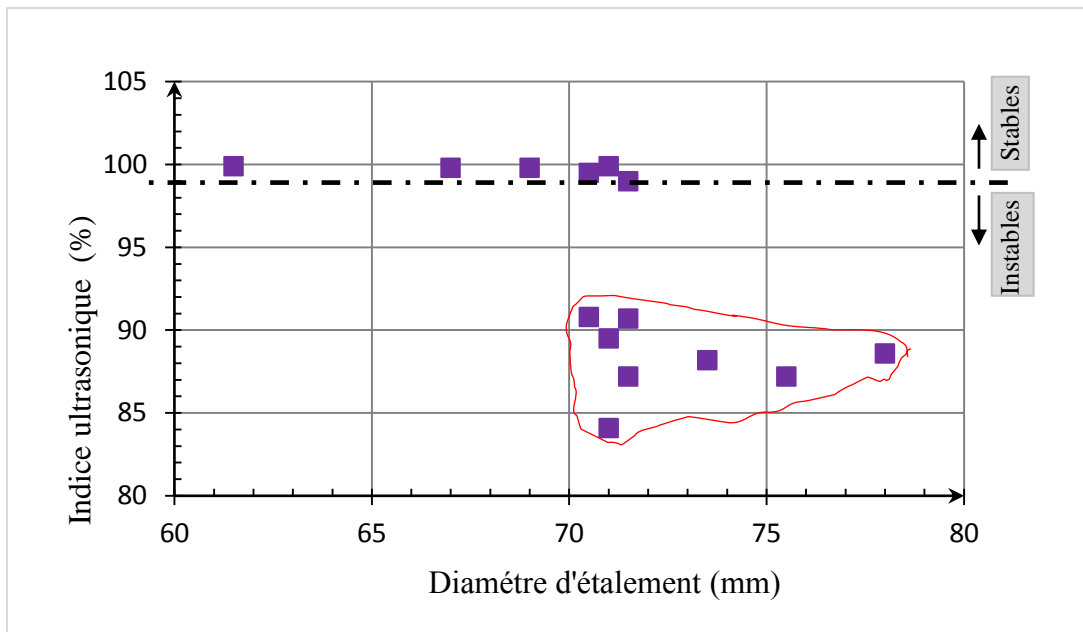


Figure IV.8-c. Evolution de l'indice ultrasonique de ségrégation en fonction du diamètre de l'étalement.

L'augmentation du diamètre d'affaissement en ajoutant plus de super-plastifiant ou d'eau a entraîné généralement une réduction de la résistance à la ségrégation mesurée par les trois essais de ségrégation. Ces variations dans ces relations ont aussi été rapportées par d'autres chercheurs (Cussih, 2003).

Les écarts types des résultats de chacun des trois essais de la ségrégation diffèrent d'un essai à un autre avec des valeurs plus importantes dans le cas des bétons instables comparativement aux bétons stables (fig. IV.9-a, b et d).

Les écarts types moyens du diamètre d'étalement sont respectivement 1.03%, 0.32% pour les bétons stables et les bétons instables. Ceux de l'indice de stabilité à la colonne sont 1,28% et 3,34%. Enfin, en ce qui concerne l'indice ultrasonique de ségrégation, on a 0,23% et 1,41%.

En général, pour tous les tests, les écarts types étaient plus élevés dans les bétons où la ségrégation était présente contrairement aux écarts types dans le cas des bétons stables

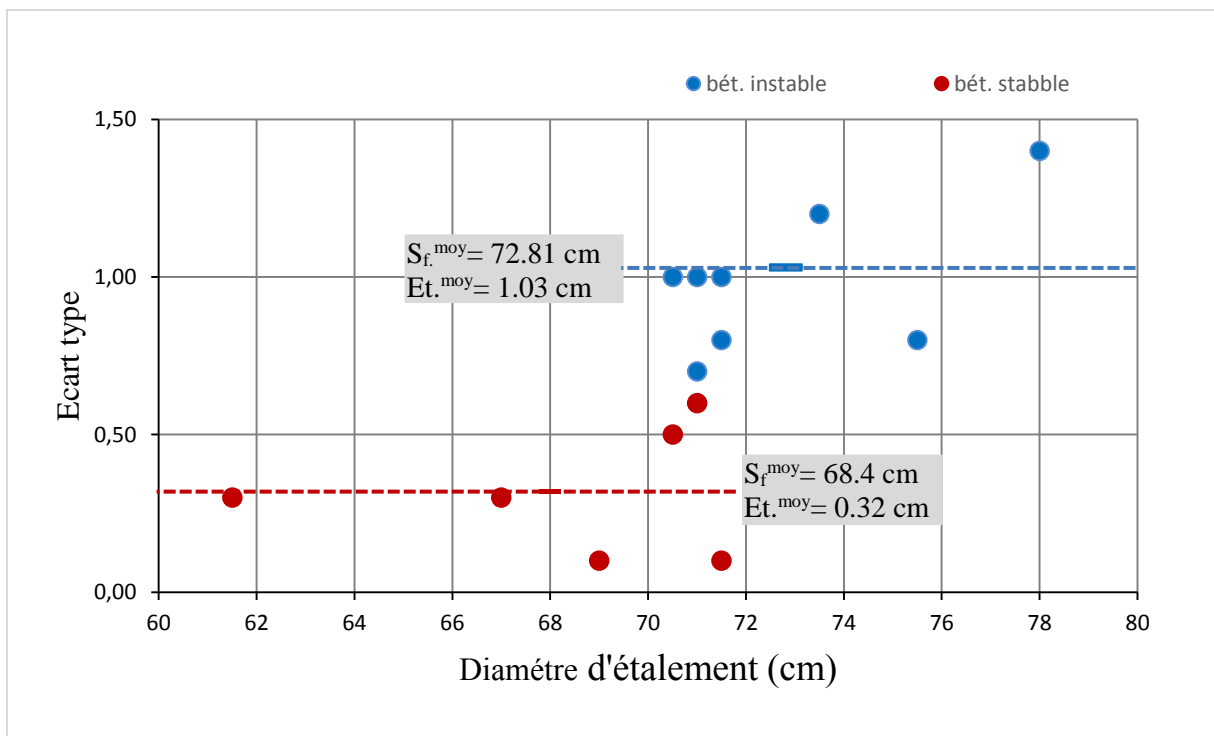


Figure IV.9-a. Relations entre l'écart type et les diamètres de l'étalement.

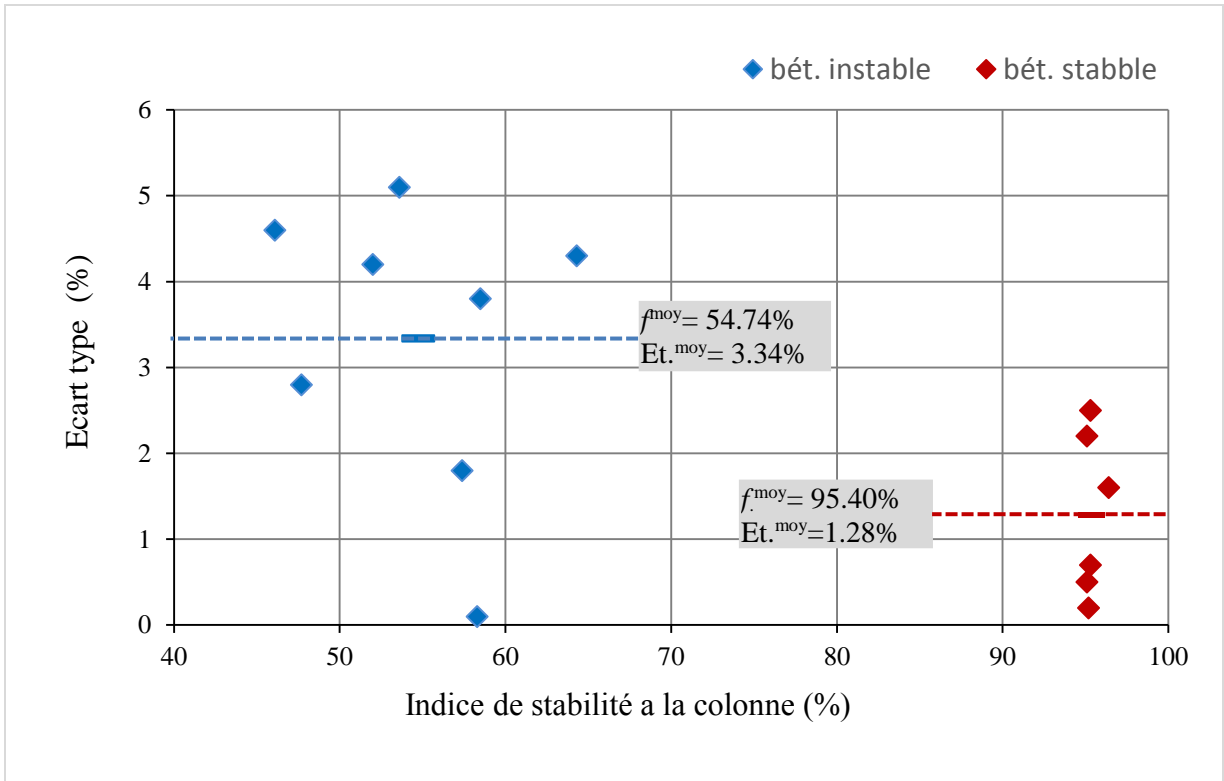


Figure IV.9-b. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité à la colonne

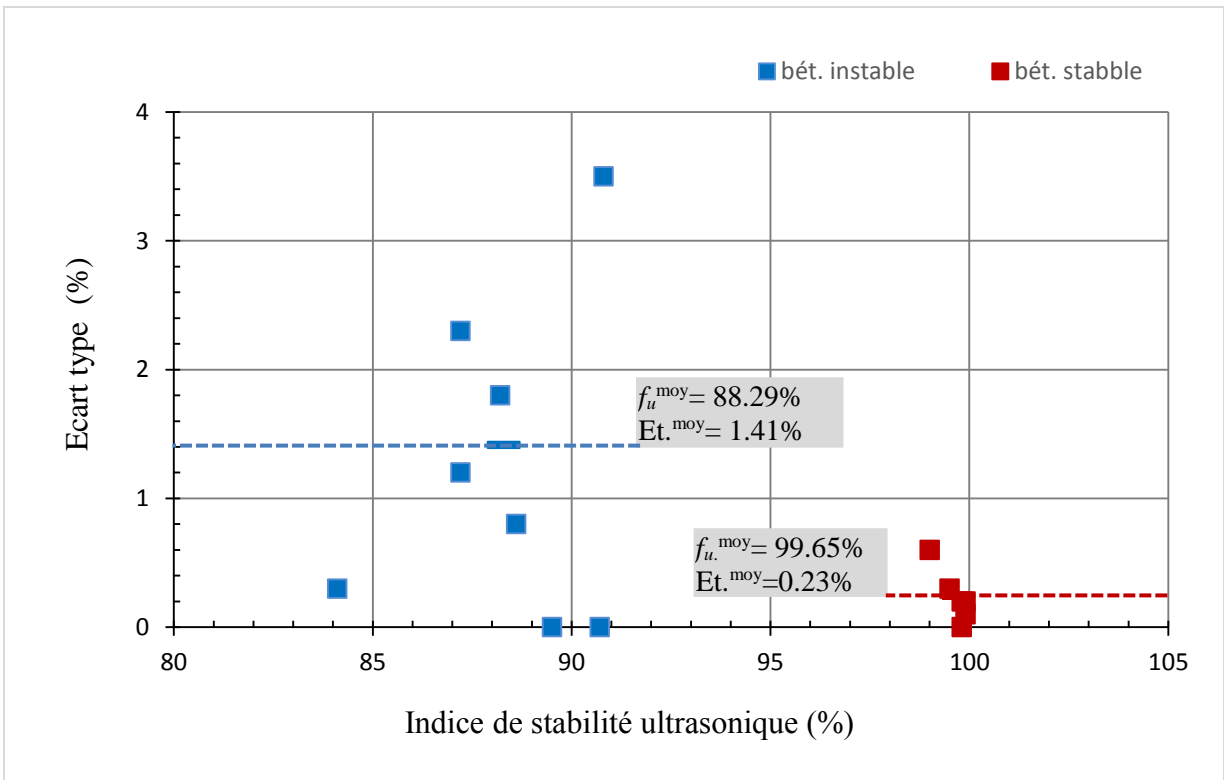


Figure IV.9-d. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité ultrasonique

IV.5- Corrélations entre les différents indices de ségrégation des bétons

IV.5.1- Corrélations entre les indices au tamis et à la colonne

Les bétons stables (C9-C14) étaient ceux dont l'indice de ségrégation au tamis était inférieur à 15% (fig. IV.10). Tous ces bétons présentaient une différence de teneur en gros granulats déterminée par l'essai de stabilité à colonne f qui ne varie pas de plus de 5% par rapport à un béton complètement stable. Si on considère l'ensemble des bétons, la relation entre ces deux indices présente une certaine imprécision ($R^2 = 0.76$). Cette imprécision est due essentiellement aux bétons instables dont leur indice chute jusqu'à moins de 50% par rapport au béton idéal (0% de ségrégation).

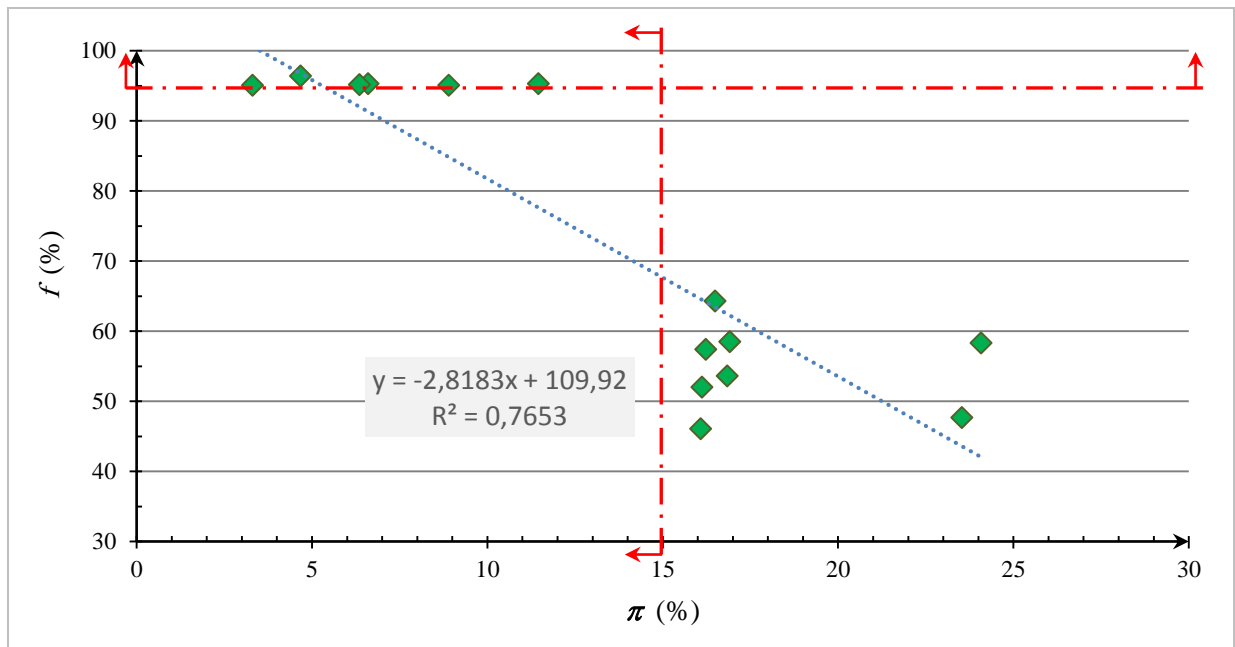


Figure IV.10. Relations entre les indices de stabilité au tamis (π) et de stabilité à la colonne (f)

IV.5.2- Corrélations entre les indices au tamis et ultrasonique

On peut avancer les mêmes remarques que précédemment, les bétons stables (C9-C14) présentent un indice ultrasonore de ségrégation f_u presque constant (moins de 2%) correspondant aux indices de ségrégation au tamis inférieurs à 15% (fig. IV.11). Quant aux bétons instables on a moins de perturbation, moins de 16 % par rapport à un béton idéal.

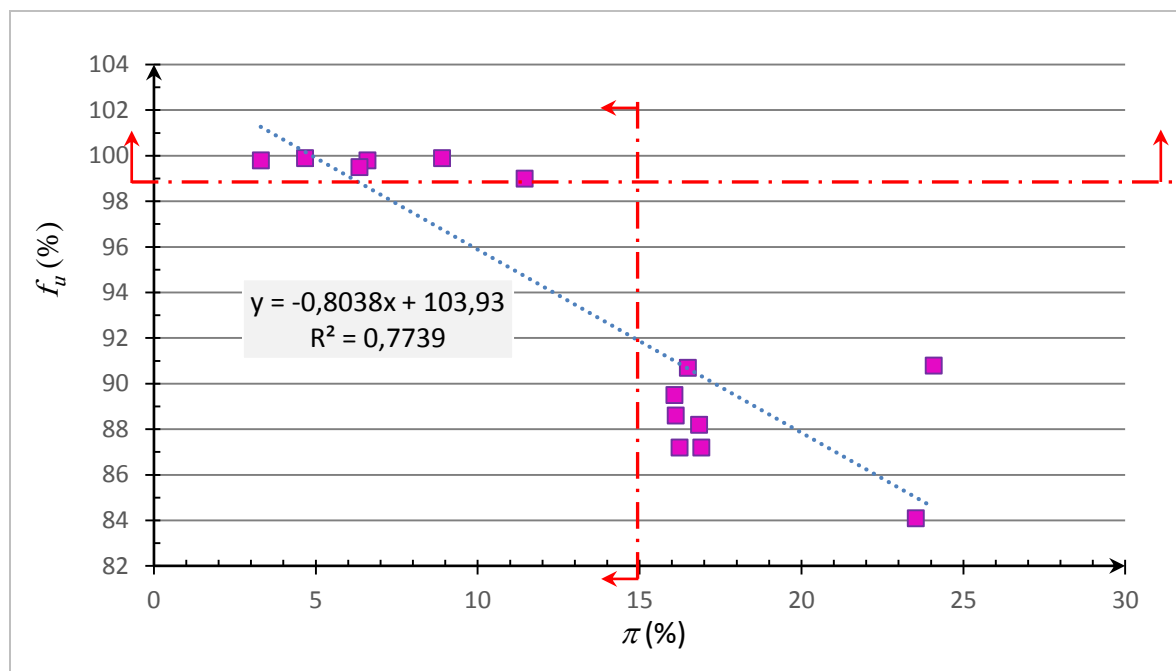


Figure IV.11- Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité au tamis (π)

IV.5.3- Corrélations entre les indices ultrasonique et à la colonne

La relation entre les indices ultrasonique de ségrégation et ceux à la colonne est beaucoup meilleure (fig. IV.12). Ceci est dû à la similitude des deux types d'essais qui sont réalisés à l'aide des mêmes corps d'épreuve (colonnes métalliques).

Finalement, les bétons stables (C9-C14) étaient ceux dont l'indice de ségrégation des tamis était inférieur à 15% (fig. IV.10, IV.11 et IV.12). Tous ces bétons présentaient un indice d'ultrasons f_u supérieur à 98%. Pour ces mélanges, lorsque la différence de teneur en gros granulats dans la colonne f ne varie pas de plus de 5%, l'indice ultrasonique de ségrégation f_u ne varie pas de plus de 2%. Pour les bétons instables ($\pi > 15\%$), les indices de ces deux dernières méthodes divergent en moyenne de plus de 35%. (Fig. IV.13).

Cette différence est due principalement au fait les essais ultrasoniques sont basés sur la transmission des ultrasons à travers le béton (gravier et mortier) alors les essais prennent en compte que la variation des masses du gravier.

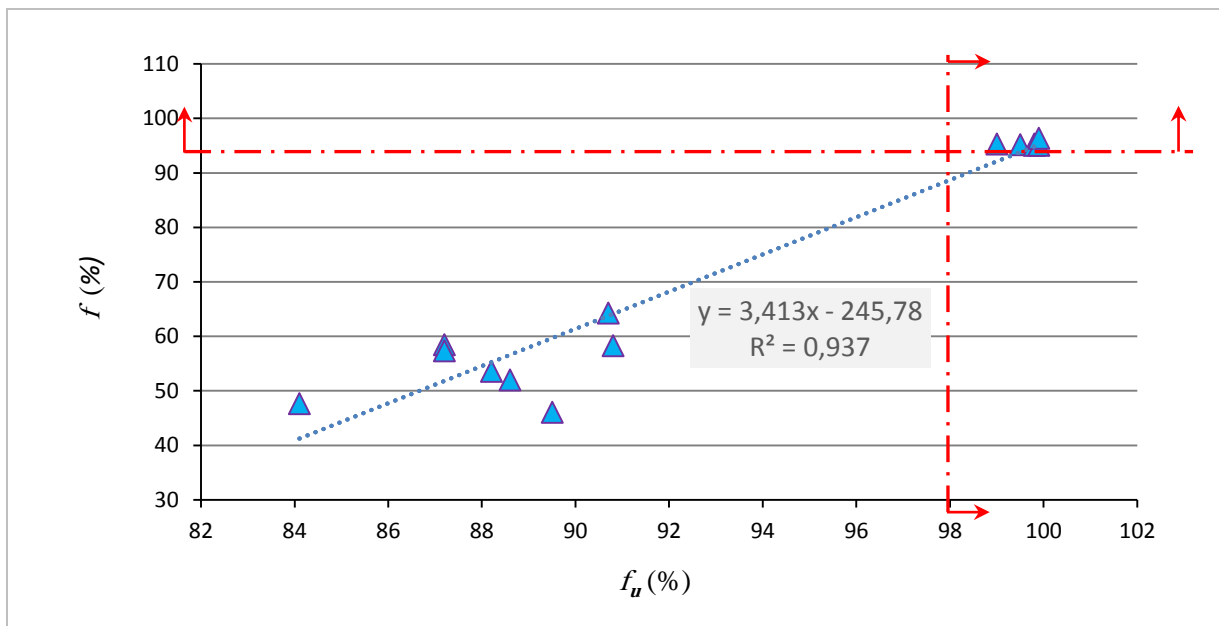


Figure IV.12- Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité à la colonne (f).

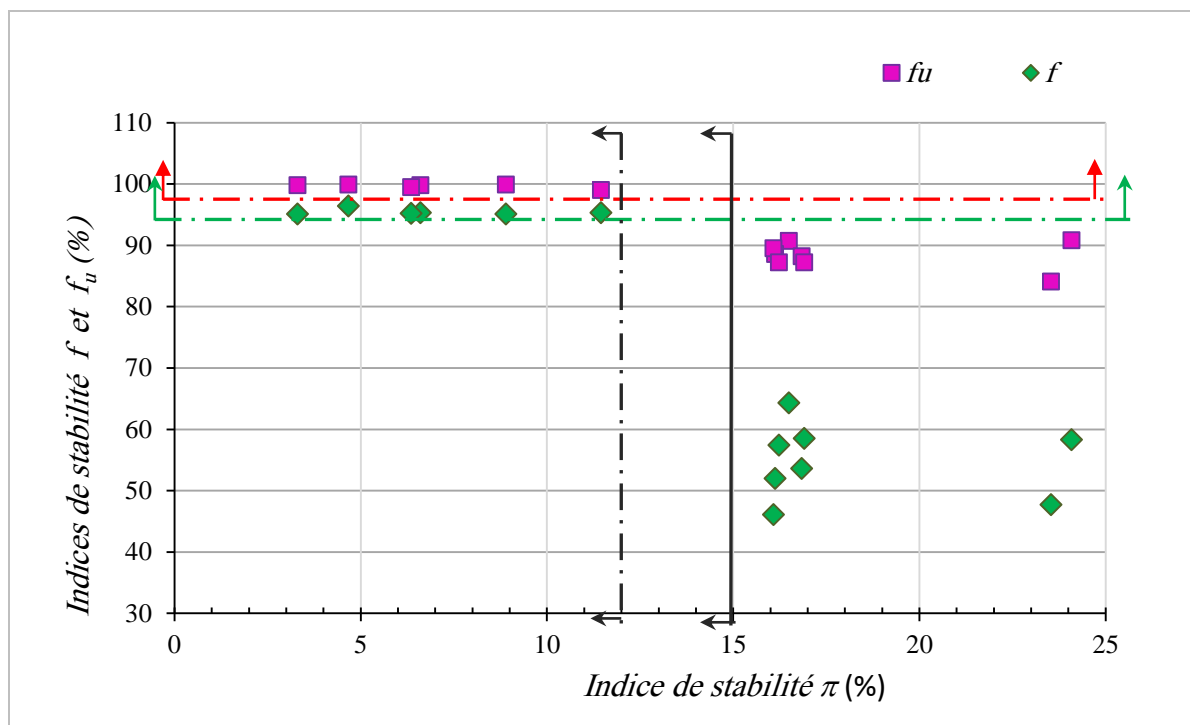


Figure IV.13- Relations entre l'indice de stabilité au tamis (π) et les indices de ségrégation à la colonne et ultrasonique (f, f_u)

IV.6- Conclusion

Dans cette étude expérimentale, une méthode ultrasonique a été testée pour diagnostiquer l'homogénéité du béton en termes de ségrégation. En considérant deux groupes de bétons (instables et stables), une diminution du rapport W/B conduit à une diminution de l'indice de stabilité au tamis π et à des augmentations distinctives des indices de ségrégation à la colonne et ultrasonique f et f_u . L'indice ultrasonique de ségrégation f_u s'est avéré moins sensible à la variation du taux de fillers calcaires utilisés, en particulier pour les mélanges instables, que l'indice de résistance à la ségrégation f . Comme prévu, la proportion d'eau était un facteur important de ségrégation pour le béton auto-plaçant. L'effet du rapport E/B a montré des résultats similaires. Ceci est dû au fait que les vitesses ultrasonores sont déterminées à travers la matrice cimentaire et les granulats (la vitesse d'impulsion dans le liant est inférieure à celle dans les granulats) alors que l'indice f concerne que la masse de graviers.

Les bétons stables (ceux ayant un indice de ségrégation au tamis inférieur à 15%) affichent tous un indice de résistance f supérieur à 95% et un indice ultrasonique f_u supérieur à 99%. Dans cette étude, les bétons stables étaient hautement identifiables des autres, quelles que soient les méthodes de mesure et les proportions d'eau utilisées, ils se sont manifestés par une constance des vitesses ultrasoniques. En tant que tel, la facilité d'utilisation de la méthode d'essai ultrasonique pour l'évaluation de la ségrégation du béton a été prouvée.

Cette étude a montré la possibilité de caractériser la ségrégation du béton avec une méthode ultrasonique, rapide et facile à utiliser. Un suivi de l'évolution de la ségrégation du béton dans le temps, de l'instant de coulage à sa prise, est donc possible avec cette méthode. De la sorte, on remplace deux méthodes de caractérisation de la ségrégation (aux états frais et durci) par une seule méthode.

Conclusion générale

Les propriétés des bétons frais, en premier lieu, a été revue à travers la description du mécanisme de l'hydratation du ciment et les conséquences physiques de l'hydratation sur la création d'un milieu poreux. La cohésion et la rigidité de la matrice solide sont procurées par l'augmentation des produits d'hydratation. La séparation des phases du béton engendre le phénomène de ségrégation dont sa caractérisation est effectuée par des essais traditionnels.

Et, en deuxième lieu, les notions d'excitation et de propagation des ondes ultrasonores et leurs applications dans la détermination de quelques propriétés des bétons ainsi que sur les caractéristiques et causes d'atténuation des signaux ultrasoniques et en fin l'application de la technique des ultrasons au cas du béton avec la sensibilité des ondes ultrasoniques à la granulométrie et la composition des bétons, a été revue.

L'étude expérimentale a été abordée, par l'exposition de la méthodologie expérimentale adoptée et la caractérisation des différents matériaux utilisés. Ainsi quatorze (14) compositions de bétons ont été soumises aux différents essais avec des variations des rapports E/L , S_p/L et F/L . La méthodologie expérimentale suivie s'articule principalement sur des mesures des indices de ségrégation et des mesures des vitesses des ultrasons (donnant des indices ultrasoniques de ségrégation).

Enfin, l'interprétation et l'exploitation des résultats expérimentaux réalisés a permet d'étudier divers relations, elles ont concernés l'évolution des vitesses ultrasoniques en fonction de divers paramètres tels que, les dosages en eau, en fillers et en superplastifiant ainsi et les corrélations entre ces vitesses (indices ultrasonores) et les autres indices de ségrégation.

Suite à ces travaux, nous avons mis au point une nouvelle méthode basée sur l'acquisition de la vitesse d'impulsion ultrasonore. Son avantage principal est la facilité de mise en œuvre, et la rapidité avec laquelle un grand nombre d'essais peuvent être faits. Elle pourra facilement s'étendre aux travaux de contrôle et vérification du phénomène de la ségrégation d'ouvrage existants en bétons.

La résistance à la ségrégation est affectée par la composition du mélange, le rapport E/L , le rapport F/L et le dosage du super-plastifiant. En isolant chacun de ces facteurs, il est possible de distinguer des tendances générales à savoir quel sera leur effet sur le diamètre d'étalement ou sur l'indice de ségrégation. Les

résultats des essais de stabilité au tamis et à la colonne (techniques classiques de mesure de la ségrégation) sont comparés aux résultats des essais non destructifs par la méthode ultrasonique proposée.

Cependant, ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres et la prédiction de la ségrégation devient relativement compliquée quand tous les facteurs sont considérés.

L'essai proposé, auscultation sonique avec mode de transmission direct, peut être utilisé pour vérifier la ségrégation du béton et contrôler sa qualité.

Sous la lumière des résultats des essais, que nous avons réalisés sur un ensemble de plus de 14 compositions différentes, les bétons dont les valeurs de l'indice de stabilité au tamis « π » est à 15% et l'indice de résistance à la colonne est « f » supérieure à 95% ne présentent pas de ségrégation et sont considérés comme stable de ce point de vue, avec une confirmation visuelle de cet aspect.

La mesure directe de la vitesse des ultrasons, permettant l'évaluation d'un indice ultrasonique de ségrégation « f_u ». Il est constaté que cet indice est supérieur à 98% pour les bétons jugés auparavant stables.

L'effet de la composition influence de manière significative le phénomène de ségrégation. Ce risque de ségrégation estimé à partir des trois essais, commence à devenir important quand le rapport E/L dépasse les 40%. L'apport des fillers calcaires jouent plutôt en faveur de la stabilité des bétons.

Le coefficient ultrasonique est moins sensible à la variation de la quantité de fines dans le béton que l'indice de ségrégation à la colonne f . La vitesse des ultrasons reste presque constante lorsque la stabilité du tamis est bonne.

Finalement, les bétons stables étaient ceux dont l'indice de ségrégation des tamis était inférieur à 15 %. Tous ces bétons présentaient un indice d'ultrasons f_u supérieur à 98%. Pour ces mélanges, lorsque la différence de teneur en gros granulats dans la colonne f ne varie pas de plus de 5%, l'indice ultrasonique de ségrégation f_u ne varie pas de plus de 2%. Pour les bétons instables ($\pi > 15$ %), les indices de ces deux dernières méthodes plus de différence.

Perspectives

Plusieurs études complémentaires doivent être poursuivies, afin de valider les résultats trouvés. On pense particulièrement à :

- Une étendue plus vaste des compositions des bétons et l'utilisation de la méthode des plans d'expérience vue la variété des paramètres de compositions E/L, F/L, Sp/L, nature des granulats,....).
- une étude de sensibilité de l'effet de la fréquence des transducteurs,
- un suivi ultrasonique de ce phénomène de ségrégation du moment du coulage du béton à sa prise. Ceci permettra d'obtenir l'évolution de la ségrégation dans le temps,
- une confrontation des résultats de cette méthode non destructive avec des mesures in-situ sur des ouvrages ayant présentés ce phénomène de ségrégation.



Table de références

[AFGC, 2002]	AFGC, (2002), Association française de Génie Civil, « Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires ».
[AFGC, 2000]	AFGC. (2000), Recommandations provisoires sur les bétons auto-plaçants, Documents Scientifiques et Techniques, French Association of Civil Engineering, 62 p.
[Aïtcin, 2001]	Aïtcin et al,(2001),« L'interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 233, pp 87-98.
[Ambroise,1999]	Ambroise J., Rols S., Péra J. (1999) "Self-leveling concrete –design and properties". <i>Concr. Sc. Eng.</i> , 1(3):140–147.
[ASTM. 2009]	ASTM, (2009), "ASTM C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete: American Society for Testing and materials, Standards 4, USA.
[ASTM. 2003]	ASTM, (2003),ASTM-C597-02. Standard test method for pulse velocity through concrete. Normalization de l'American Society of Testing Materials,
[Atapattu, 1995]	Atapattu et al. 1995, creeping sphere motion in Hershel-Bulkley fluids: flow field and drag, <i>Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics</i> , 59, pp. 245-265.
[Barcelo, 2001]	Barcelo L., (2001), "Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge", Thèse de doctorat, Cachan, ENS Cachan-LMT, 293p.
[Baron, 1982]	Baron, J. and Sauterey, (1982), 'Le béton hydraulique. Connaissance et pratique', Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 560.
[Bauchkar, 2014]	Bauchkar Sunil D. and Chore H.S. (2014) "Rheological properties of self-consolidating concrete with various mineral admixtures" <i>Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal Vol. 51(1)</i> , 1-13.
[Beaupre, 1994]	Beaupre D. (1994), "Rheology of High Performance Shotcrete", Ph.D. Thesis, University of British Columbia.
[Benaïcha, 2015]	Benaïcha M. and al. (2015), "Prediction of Self-Compacting Concrete homogeneity by ultrasonic velocity" <i>Alexandria Engineering Journal</i> 54, 1181–1191.
[Benboudjema, 2002]	Benboudjema, F., (2002), "Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations bi-axiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires", Thèse de doctorat, Marne la Vallée, Université de Marne-La-Vallée, UFR de Sciences et Technologies, 258 p.
[Benouis, 2011]	Benouis A. and Grini A. (2011) "Estimation of concrete's porosity by ultrasound", <i>S.D., Physics Procedia</i> , 21, 53-58.
[Bensebti, (2008)]	Bensebti S. (2008), "Essai de caractérisation expérimentale de la ségrégation verticale des bétons autoplaçants", Thèse de Doctorat, université de Constantine, Algérie.
[Bentz, 2000]	Bentz, D. P., (2000), 'A three-dimensional cement hydration and microstructure development modelling package. Version 2.0, NISTIR 6269, Gaithersburg, Maryland, NIST Building and Fire Research Laboratory US.
[Beris, 1985]	Beris et al.,1985, <i>Creeping Motion of a sphere through a Bingham plastic</i> , <i>Journal of Fluid Mechanics</i> , 158, pp. 219-244.
[Berryman, 1990]	Berryman J. G., 1990, Confirmation of biot's theory. <i>Appl. Phys. Lett.</i> , vol. 37, no. 4, pp. 382-385.
[Bethmont, 2005,]	Bethmont S., 2000, mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) -Etude expérimentale des interactions granulaires-, Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris France.
[Bian, 2009]	Bian H. (2009) Etude expérimentale de l'endommagement de BFUHP sous sollicitations physique, chimique et mécanique. Thèse de doctorant, l'INSA Rennes, 2009, 184 p.
[Biot, 1956]	Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: i. low-frequency range," <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> , vol. 28, pp. 168-178.
[Bissonnette, 1996]	Bissonnette, B., (1996) "Le fluage en traction un aspect important de la problématique des réparations minces en béton", PhD thesis, Québec, Université Laval, Faculté des sciences et de génie -Département de génie civil,
[Bissonnette, 2000]	Bissonnette, B., J. Marchand, J. P. Charron, A. Delagrave and L. Barcelo, (2000), 'Early Age Behavior of Cement-Based Materials, <i>Materials Science of Concrete VI</i> : 243-326.
[Bohlen, 2000]	Bohlen, T. Kugler S., Klein G., and Theilen F., 2004, 1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion. <i>Geophysics</i> , 69(2) :330–344.

[Bouhamou, 2008]	Bouhamou N. et al. (2008), l'Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplacant à l'état frais, Afrique SCIENCE, 04 (1) pp. 1 – 20
[Bourbie, 1986]	Bourbie T., Coussy O., and Zinszner B., 1986, Acoustique des milieux poreux. Ed. Technip.
[Bourbie, 1987]	Bourbié T., Coussy O., and Zinszner B., 1987, Acoustics of Porous Media. Technip, IFP.
[Bresson, 2005]	Bresson, A., (2005), "Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge", Maîtrise en Génie Civil, Laval University, Québec, 197 p.
[Breul, 2008]	Breul, P., Geoffray, J. M. and Haddani, Y. (2008), "On Site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis", Advanced Concrete Technology, 6 (1), 171-180.
[Briscoe, 1992]	Briscoe et al., 1992, <i>The falling of Spheres through Bingham Fluids</i> , Colloids and Surface, vol 65, pp 69-75.
[British, 2004]	British, (2004), Testing Concrete. Part 4. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity, Standards Institution BS EN 12504-4, London.
Brown, 1986]	Brown P., Harner C. and Prosen E., (1986), 'The effect of inorganic salts on tricalcium silicate hydration'. Cement and Concrete Research, 16(1) :17-22.
[BS, 1881]	BS 1881: Part 203 recommends minimum path lengths of 100mm and 150 mm for concrete with maximum aggregate sizes of 20 and 40 mm, respectively.
[Bullock, 1959]	Bullock, R.E. and Whitehurst, E.A. (1959), "Effect of certain variables on pulse velocities through concrete", Highway Res. Board Bull., 206, 37.
[Bury, 2002]	Bury, Christensen, (2002), "The role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete", Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 Novembre, Chicago, pp 141-146.
[Byfors, 1980]	Byfors J., (1980), "Plain concrete at early ages", these de doctorat, Swedish Cement and concrete Institute.
[Carlsward, 2003]	Carlsward et al., (2003), "Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete", Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
[Cawley, 1996]	Cawley P. and Alleyne D., 1996, the use of lamb waves for the long-range inspection of large structures. <i>Ultrasonic</i> , 34:287-290.
[Chaix, 2003]	Chaix J.F., 2003, Caractérisation non destructive de l'endommagement des bétons : Apport de la diffusion ultrasonore. PhD thesis, LCND, Université de la méditerranée, France.
[Chaix, 2006]	Chaix J.F., Garnier V., Corneloup, 2006, Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media: Theoretical analysis and experimental validation, <i>Ultrasonic</i> 44, p. 200-210.
[Chanvillard, 1999]	Chanvillard, G. (1999), 'Le matériau béton', connaissances générales, Lyon, ALEAS Editeur.
[Charron, 2003]	Charron, J. P., (2003), "Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte", PhD thesis, Université Laval, Département Génie Civil, Québec, 332 p.
[Chhabra, 2003]	Chhabra R.P. 1993, <i>Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids</i> , CRC Press, 417 pages.
[Coste, 2003]	Coste C. and Gilles B., 1999, On the validity of hertz law for granular material acoustics," <i>Eur. Phys. J. B.</i> , vol. 7, pp. 155-168.
[Coste, 1999]	Coste C. and Gilles B., 1999, On the validity of hertz law for granular material acoustics," <i>Eur. Phys. J. B.</i> , vol. 7, pp. 155-168.
[Coste, 1997]	Coste C., Falcon E., and Fauve S., 1997, Solitary waves in a chain of beads under hertz contact," <i>Phys. Rev. E.</i> , vol. 56, pp. 6104-6116.
[Coussy-a, 2004]	Coussy, O. (2004), 'Poro Mechanics', England, John Wiley & Sons.
[Coussy-b, 2004]	Coussy, O., P. Dangla, T. Lassabatere and V. Baroghel-Bouny, (2004), "The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials," <i>Materials and Structures</i> , 37, 265,15 -30,,
[Cussigh, 2003]	Cussigh, F. et al. (2003), "Project testing SCC-segregation test methods." In: Wallevik O., Nielsson I. (eds) <i>Self-Compacting Concrete</i> . Third international RILEM symposium on self-compacting concrete, Reykjavik. RILEM Publications SARL, Bagnaux, p 311.

[Cuxac, 1991]	Cuxac P., 1991. Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes. Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy.
[De Larrad, 1996]	De Larrard et al, (1996), « La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performance », Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n°202, pp 61-69.
[De Larrard, 1998]	De Larrard et al., (1998), "Fresh Concrete: A Hershel-Bulkley Material", Materials and Structures, vol 31, pp 494-498.
[De Larrard, 1999]	de Larrard, 1999, <i>Structures granulaires et formulation des bétons</i> , Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34. (Ouvrage original : F. DE LARRARD, "Concrete Mixture-Proportioning – A Scientific Approach", Modern Concrete Technology Series, No. 9, E & FN SPON, Londres.
[De Schutter, 2005]	De Schutter G., (2005), G.F.T.F.S.C.C., "Measurement of properties of fresh self-compacting concrete" Guidelines TESTING-SCC, 15-23. Ehttp://www.civeng.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC/.
[Digby, 1981]	Digby P. J., 1981, the effective elastic moduli of porous granular rocks," J. Appl. Mech., vol. 48, pp. 803-808.
[Duffy, 1957]	Duffy X. and Mindlin R. D., 1957, Stress-strain relation and vibrations of granular medium," J. Appl. Mech., vol. 24, pp. 585-593.
[Duran, 1997]	Duran J., 1997, Sables, poudres et grains. Paris : Eyrolles.
[Duran, 1993]	Duran J., Rajchenbach J., and Clément E.,1993, Arching effect model for particle size segregation," Phys. Rev. Lett., vol. 70, pp. 2431-2434.
[EFNARC, 2005]	EFNARC, 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production, and Use, UK: Association House, 2005.www.efnarc.org.
[Elvery, 1969]	Elvery, R.H., Din, N.M, 1969. Ultrasonic Inspection of Reinforced Concrete Flexural Members. Proc. Symp. On Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, Londres, Juin, p.23
[Emborg, 1999]	Emborg, (1999), "Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production", Proceedings of the 1 st international RILEM Symposium, Stockholm, pp95-105.
[NF EN, 2005]	NF EN 12504-4 , Mai 2005 :Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son – Afnor-
[EN, 2010]	EN 12350-11, 2010: European standard "Testing fresh concrete - Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test" ISBN 978 0 580 69215 4, ICS 91.100. 30.
[ENG, 2012]	Entreprise nationale des granulats " rapport d'analyse du laboratoire centralen° 84 du 02-08-2012, Algérie.
[Eslami, 2010]	Eslami J., 2010. Étude de l'endommagement à court et long terme d'une roche poreuse par méthodes acoustiquesN. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
[Feldman, 1968]	Feldman, R. F. and P. J. Sereda, (1968), "A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties," Matériaux et Constructions, 1, 6, 509-520.
[Ferraris, 1992]	Ferraris et Gaidis, (1992), "Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste", ACI Materials Journal, vol 88, n°4, pp 388-393.
[Ferraris, 1999]	Ferraris, (1999), "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol 104, n°5, pp461-478.
[Ferraris, 1998]	Ferraris, de Larrard, (1998), "Testing and modeling of fresh concrete technology", NIST, NISTIR 6094.
[Ferraris, 2001]	Ferraris, Obla et Hill, (2001), "Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete", Cement and concrete research, vol 31, pp245-255.
[Ferroir, 2004]	Ferroir, Huynh, Coussot, 2004, <i>Motion of solid object trough a (thixotropic) paste</i> , Physics of fluid, vol 16, pp 594-601.
[Fethi, 2007]	Fethi Soltani, Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, 2007, Etude expérimentale de la propagation de l'onde de surface dans un milieu poreux sec et saturé, LML UMR CNRS 8107, Ecole centrale de Lille, IEMN DDOAE UMR CNR 8520, Ecole centrale de Lille. Villeneuve d'Ascq, France.
[Flatt, 2001]	Flatt et Houst, (2001), "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizer", Cement and Concrete Research, vol 31, pp 1169-1176.
[Flatt, 2004]	Flatt, (2004), "Toward a prediction of superplasticized concrete rheology", Materials and structures, vol 37, pp 289-300.
[Folliot, 1982]	Folliot, A. and M. Buil, (1982), 'La structuration progressive de la pierre de ciment', In Le béton hydraulique -Connaissance et pratique, J. Baron and R. Sauterey, Presse de l'ENPC, Paris.

[Fortin, 2005]	Fortin J., 2005. Compaction homogène et compaction localisée des roches poreuses. Étude expérimentale et théorique. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure.
[Fukuhara, 1981]	Fukuhara M., Goto S., Asaga K., Daimon M. et Kondo R., (1981), 'Mechanisms and kinetics of c4af hydration with gypsum', <i>Cement and Concrete Research</i> , 11:407-414.
[Garnier, 2012]	Garnier V., 2012. Ultrasounds through transmission. Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques. Breyse D., ed. RILEM, Springer books, p. 17-27.
[Garnier, 2005]	Garnier V., Abraham O., Dondonné E., Marlot D., 2005, Méthodes d'évaluation non destructive par propagation d'ondes mécaniques. Guide méthodologique de l'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé. Breyse D. et Abraham O., Presses ENPC, Paris, p. 201-234.
[Ghafoori, 2010]	Ghafoori, N. and Diawara, H. (2010), "Evaluation of fresh properties of self-consolidating concrete under long transportation time and extreme temperature", <i>Proceeding of SCC 2010, Design, Production and Placement of Self-consolidation concrete</i> (Ed. by Khayat, K.H. and Feys, D.), Canada, 139-152.
[Ghezal, 2010]	Ghezal.A, Khayat.KH., "Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods", <i>ACI Mater</i> , J.99(3) pp. 264-272
[Gibson, 2005]	Gibson A. and Popovers, 2005, Lamb waves basis for impact-echo method analysis. <i>J. Engrg. Mech.</i> , 131(4) :438-443.
[Gilles, 2003]	Gilles B. and Coste C., 2003, Low-frequency behavior of beads constrained on a lattice," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 90, no. 17, p. 174302.
[Golaszewski, 2004]	Golaszewski, Swabowski, (2004), "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars", <i>Cement and Concrete Research</i> , vol 34, pp 235-248.
[Grzeszczyk, 2004]	Grzeszczyk S. and Podkowa P. (2004), "Effect of micro filler on the properties of self-compacting concrete mixture", <i>XIX Conference JADWISIN 2004, Concrete and prefabrication</i> , 257-262.
[Guoxuan, 2011]	Guoxuan, X., Min, D., Haiqing, H. and Mingshu, T. (2011), "Absorbing and mechanical properties of cement-based composites with nano-titanic oxide absorbent", <i>Adv. Mater. Res.</i> , 177, 558-561.
[Hanaa, 2017]	Hanaa F., (2017), Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplaçants exposés à une température élevée, Doctorat de l'Université de Cergy Pontoise.
[Hamidian, 2012]	Hamidian M., et al. (2012), "Application of Schmidt rebound hammer and ultrasonic pulse velocity techniques for structural health monitoring" <i>Scientific Research and Essays</i> , 7(21), pp. 1997-2001.
[Hasni, 1999]	Hasni L., Bétons Autoplaçants, Synthèse Bibliographique Rapport de Recherche N°. 98-004 /98-006, CEBTP, Juillet 1999.
[Hansen, 1986]	Hansen, T. C., (1986), "Physical structure of hardened cement paste. A classical approach," <i>Materials and Structures</i> , 19, 114,423-436, 1986]
[Hattori, 1979]	Hattori, K., 1979, "Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan," <i>Superplasticizers in Concrete</i> , SP-62, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 37-66.
[He, 2001]	He, Laskowski, Klein, 2001, <i>Particle movement in non-Newtonian slurries: the effect of yield stress on dense medium separation</i> , <i>Chemical Engineering Science</i> , 56, pp. 2991-2998.
[Hernandez, 2016]	Hernandez L., Margarita A., (2016), "Influence of mix design parameters on dynamic segregation of self-consolidating concrete and consequences on performance of precast beams", <i>Masters Theses</i> , 7557. Missouri university of science and technology master of science in civil engineering. http://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7557
[Hertz, 1882]	Hertz H., 1882, Über die ber uhrung fester elastische korper," <i>J. reiner und angewandte Mathematik</i> , vol. 92, pp. 156-171.
[Hill, 1980]	Hill T. and Knopo L., 1980, Propagation of shock waves in one-dimensional crystal lattices," <i>J. Geophys. Res.</i> , vol. 85, pp. 7025-7030.
[Hostler, 2005]	Hostler S. R. and Brennen C. E., 2005, Pressure wave propagation in a granular bed," <i>Phys. Rev. E</i> , vol. 72, pp. 031303 (1-13).
[Hsu, 1999]	Hsu et al., (1999), "Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability", <i>cement and concrete composites</i> , vol 21, pp 425-430.
[http.pdf, 2016]	http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf (consulted 07-2016)
[Hu, 1995]	Hu, (1995), « Rhéologie des Bétons fluides », études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 20.

[Hua, 1995]	Hua, C, 1995. Analyses et modélisations du retrait d'auto dessiccation de la pâte de ciment durcissante, LCPC OA 15 - Issu du rapport de thèse de l'ENPC, Paris
[Huet, 1982]	Huet C., (1982) Propriétés acoustiques in 'Le béton hydraulique', Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées Paris, pp. 423-52.
[Husson, 1991]	Husson, S. 1991. <i>Etude physicochimique et mécanique des interactions ciment-filler, Application aux mortiers</i> . Thèse doctorat, INIST-CNRS, Cote INIST : T 82906.
[IAEA, 2002]	IAEA, (2002), "Training Course Series 17: "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures", Vienna. pp 100-111.
[Igarashi, 2003]	Igarashi I., Bentur A. et Kovler K., (2003), Autogenous shrinkage and induced restrainings tresses in high-strength concretes. <i>Cement and Concrete Research</i> , 30:1701-1707.
[Iida, 1939]	Iida K., 1939, Velocity of elastic waves in a granular substance," <i>Bull. Earth. Res. Int.</i> , vol. 17, pp. 783-808.
[Irrigaray, 2016]	Irrigaray M. A. P., Pinto R. C. de A., Padaratz I. J. (2016), "A new approach to estimate compressive strength of concrete by the UPV method", <i>Rev. IBRACON Estrut. Mater.</i> vol.9 no.3 São Paulo.
[ISO, 2004]	ISO, (2004), ISO1920-7, Testing of concrete - Part 7: Nondestructive tests on hardened concrete, published by ISO.
[Jacobs, 2000]	Jacobs L.J. and Owino J.O., 2000, Effect of aggregate size on attenuation of rayleigh surface waves in cement-based materials. <i>J. Eng. Mech. - ASCE</i> , 126(11) :1124-1130.
[Jacques, 2012]	Jacques D.F., 2012. Contrôle non destructif (CND). Dossier Techniques de l'Ingénieur.
[Jaeger, 1996]	Jaeger H. M., Nagel S. R., and Behringer R. P., 1996, Granular solids, liquids, and gases," <i>Rev. Mod. Phys.</i> , vol. 68, no. 4, pp. 1259-1273.
[Jean, 2012]	Jean-Pierre Lefebvre et al. 2012. L'acoustique ultrasonore et ses applications, 1 ^{re} partie. Laboratoire de mécanique et d'acoustique UPR CNRS 7051.
[Jérôme, 2011]	Jérôme L., 2011, Etude d'un matériau granulaire sec par ondes ultrasonores : effet non linéaire, atténuation et diffusion, thèse de Doctorat, Université Paris-Est.
[Jia, 2009]	Jia X P, Laurent J, Khidas Y, et al. 2009, Sound scattering in dense granular media. <i>Chinese Sci Bull</i> , 54: 4327-4336
[Jia, 1999]	Jia X., Caroli C., and Velicky B., 1999, Ultrasound propagation in externally stressed granular media," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 82, pp. 1863-1866.
[Jiang, 1995]	Jiang S., Mutin J. et Nonat A., (1995), 'Studies on mechanisim and physico-chemical parameters at the origin of cement setting. i. the fundamental processes involved during the cement setting', <i>Cement and Concrete Research</i> , 25(4):779-789.
[Jin, 2002]	Jin, (2002), « Properties of mortar for self-compacting concrete », PhD thesis de l'Université de Londres, 398 pages.
[Job, 2005]	Job S., Melo F., Sokolow A., and Surajit S., 2005, How hertzian solitary waves interact with boundaries in a 1d granular medium," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 94, no. 17, p. 178002.
[Job, 2014]	Job T. and Harilal B. (2014) "Fresh and hardened properties of concrete containing cold bonded aggregates" <i>Advances in Concrete Construction</i> , 2 (2), 77-89.
[Johnson, 1982]	Johnson D. L. and Plona T. J., 1982, Acoustic slow waves and the consolidation transition, <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> , vol. 72, pp. 556-565.
[Johnson, 2003]	Johnson D. L., Plona T. J., Scala C., Pasierb F., and Kojima H., 1982, Tortuosity and acoustic slow waves," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 49, pp. 1840-1844.
[Johnson, 4985]	Johnson K. L., 1985, <i>Contact Mechanics</i> . Cambridge : Cambridge Univ. Press.
[Jolicoeur, 1998]	Jolicoeur et Simard, (1998), « Chemical admixture-Cement interactions : Phenomenology and physico-chemical concepts », <i>Cement and Concrete Research</i> , vol 20, pp 87-101.
[Jones, 1962]	Jones, R. (1962), <i>Non-Destructive Testing of Concrete</i> , Cambridge University Press, London.
[Kaplan, 1959]	Kaplan, M.F. (1959), "the effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete", <i>Mag Conc Res</i> , 11(32), 85.
[Khayat, 1999]	Khayat, (1999), "Workability, Testing and performance of self-compacting concrete", <i>ACI Materials Journal</i> , vol 96, n°3.
[Khayat, 1997]	Khayat. H.K. and Guizani. Z. (1997), "Use of viscosity-modifying admixtures en enhance stability of fluid concrete", <i>ACI Mater. J.</i> 94 (4) 332-340.

[Klur, 1996]	Klur I., (1996), 'Etude par RMN de la Structure des Silicates de Calcium Hydratés', Thèse de doctorat, Université Paris.
[Kumavat, 2014]	Kumavat H. R., Tapkire G., Patil P. S., Chitte C. J., (2014) "Condition assessment of concrete with ndt International Journal of Research in Engineering and Technology e ISSN: 2319-1163 p ISSN: 2321-7308, JUNE.
[Lachemi, 2003]	Lachemi M., Mesbah H., Petroov N. et Ait P., (2000), CIN: Minimizing autogenous shrinkage and early age cracking in high performance concrete structures,
[Lamb, 1904]	Lamb H., 1904, on the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. <i>Phil. Trans. Roy.Soc. London</i> , 203:1–42.
[Landau, 1970]	Landau L. and Lifshitz E., 1970, Théorie de l'élasticité - Tome 7, Oxford : 2nd edition, Pergamon press.
[Landis, 1995]	Landis E.N. and Shah S.P., 1995, Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials. <i>J. Eng. Mech. - ASCE</i> , 121(6) :737–743.
[Langenberg, 1995]	Langenberg K. and al, 1995. Electromagnetic and elastic wave scattering and inverse scattering applied to concrete, International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) Berlin, pp. 713-720.
[Lazaridi, 1985]	Lazaridi A. N. and Nesterenko V. F., 1985, Observation of a new type of solitary waves in a one dimensional," <i>J. Appl. Mech. Technol. Phys.</i> , vol. 26, pp. 405-408.
[Le Chatelier, 1904]	Le Chatelier H., (1904), 'la Constitution des Mortiers Hydrauliques', Recherches Expérimentales.
[Legrand, 1971]	Legrand C., (1971), « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
[Li, 2011]	Li, B., Duan, Y., Zhang, Y. and Liu, S. (2011), "Electromagnetic wave absorption properties of cement-based composites filled with porous materials", <i>Mater Design</i> , 32(5), 3017-3020.
[Li, 2013]	Li, L., Kwan, G. and Kh, A. (2013), "Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness", <i>Cement and Concrete Composite</i> , V.39, 33–42.
[Liu-b, 1993]	Liu C. H. and Nagel S. R., 1993, Sound in granular material: disorder and nonlinearity," <i>Phys. Rev. B.</i> , vol. 48, no. 21, pp. 15646-15650.
[Liu-a, 1992]	Liu C. H. and Nagel, S. R., 1992, Sound in sand," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 68, no. 15, pp. 2301-2304.
[Love. 1911]	Love. A. E. H., 1911, <i>Some Problems of Geodynamics</i> . Cambridge University Press, Cambridge.
[Lowke, 2003]	Lowke A. et al. (2003), a simple and significant segregation test for SCC, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande.
[Lozev, 1996]	Lozev, M.G., Lane, D.S. ; Clemena. G.G. ; Nakleh, N.J., (1996). Nondestructive Evaluation of Concrete Consolidation Using a Pulsed Ultrasonic Interferometer. <i>Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials</i> , pp. 39-54.]
[Makse, 2004]	Makse, H. A., Gland N., Johnson D. L., and Schwartz L., 2004, Granular packing: nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics," <i>Phys. Rev. E.</i> , vol. 70, p. 061302(19).
[Malhotra, 1991]	Malhotra, V.M., Carino, N.J. (1991), "Handbook on Non Destructive Testing of Concrete", CRC Press LLC.
[Mansoutre, 2000]	Mansoutre, (2000), « Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés », thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 132 pages.
[Marc, 2007]	Marc Goueygou, Fethi soltani, Zoubeir Lafhaj, Bogdan Piwakowski, Pawel Safiniwski, Jean-paul Balayssac, 2007, relation entre la vitesse ultrasonore et la porosité dans le mortier et le béton, Groupe électrique-acoustique, IEMN DDOAE UMR CNR 8520, Ecole centrale de Lille.
[Marchand, 2005]	Marchand, J., (2005), 'Cours de Durabilité du béton', 6ème cycle, Université Laval, Québec, Canada.
[Marie, 2006]	Marie-Aude P., 2006. Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable auténitique. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
[McHenry, 1967]	McHenry, D., Oleson, C.C., 1967. Pulse Velocity Measurement on Concrete Dams. <i>Trans. 9th Int. Congr. On Large Dams. Istanbul</i> , Q34, R5, V.3, 73.
[Mesbah, 2011]	Mesbah, H.A., Yahia, A. and Khayat, K.H. (2011), "Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete", <i>Cement and Concrete Research</i> 41 451–458.

[Mitani, 2003]	Mitani H., (2003.), 'Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux', Thèse de doctorat, ENPC 'Ecole nationale des ponts et chaussées.
[Mounanga, 2004]	Mounanga, P., A. Khelidj, A. Loukili and V. Baroghel-Bouny, (2004), "Predicting Ca (OH) 2 content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach," <i>Cement and Concrete Research</i> , 34, 255-265.
[Nachbaur, 2001]	Nachbaur L., Muti J., Nonat A. et Choplin L.(2001), 'Dynamic mode rheology of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting', <i>Cement and Concrete Research</i> , 31(2):183–192.
[Naik, 1991]	Naik, T. R., Malhotra, V. M. (1991) "Chapter 7: the ultrasonic pulse velocity method, in: V.M. Malhotra, N.J. Carino, (Eds.), <i>CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete</i> , CRC Press, 1991, pp. 169–188.
[Nakamura, 1999]	Nakamura, Ogawa, (1999), "Influence of interaction between sand and superplasticizer on the fluidity of concrete", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 21, pp 15- 20.
[Nehdi, 2004]	Nehdi et Rahman, (2004), "Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological model for different test geometry, gap, and surface friction", <i>Cement and concrete research</i> , vol 34, pp 1993-2007.
[Nesterenko, 1983]	Nesterenko V. F., 1983, Propagation of nonlinear compression pulses in granular media," <i>J. Appl. Mech. Technol. Phys. (USSR)</i> , vol. 24(5), pp. 733-743.
[Neville, 2000]	Neville, A. M. (2000), 'Propriétés des bétons, Paris, Eyrolles, 810 p.
[NF EN, 2007]	NF EN 13791: 2007 Assessment of concrete compressive strength in structures or in precast concrete products.
[NF-EN, 2005]	NF-EN-12504-4. Essais pour les bétons dans les structures - partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son. Normes Française, AFNOR, 2005.
[Nist, 2001]	Nist, (2001), "Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC", Nantes, France, NIST 6819, 147 pages.
[Nonat, 1992]	Nonat A. et J. Mutin, (1992), 'Hydration and setting of cements', E&F Spon, London.
[Nonat, 1994]	Nonat, A. 1994. Interaction between chemical evolution and physical evolution, in the case of tricalcium silicate. <i>Materials and Structures</i> : 187-195.
[Ohdaira 2000]	Ohdaira E. and Masuyama N., 2000, Water content and its effects on ultrasound propagation in concrete. <i>Ultrasonics</i> , 38 :546–552.
[Okamura, 1995]	Okamura H. and Ozawa K., 1995, mix design for self-compacting concrete, Library of JSCE, N°: 25.
[Okamura, 2003]	Okamura H., Ouchi, M. (2003), "Self-compacting concrete", <i>Advanced Concrete Technology</i> , 1(1), 5-15.
[Otsuki, 2000]	Otsuki N., Iwanami M., Miyamoto S., and Hara N., 2000, Influence of aggregates on ultrasonic elastic waves propagation in concrete. In Elsevier, editor, <i>Non Destructive Testing in Civil Engineering</i> , pages 313–322, Tokyo, Japan.
[Ouchi, 1999]	Ouchi et al. (1999), "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 21, pp 1-6.
[Ould naffa, 2002]	Ould-Naffa S., Goueygou M., Piwakowski B., and Buyle-Bodin F., 2002, Detection of chemical damage in concrete using ultrasound. <i>Ultrasonics</i> , 40:247–251.
[Paco, 2010]	Paco Diederich, (2010), « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement auto-plaçant du béton », thèse de doctorat, l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
[Panesar, 2012]	Panesar, D.; Shindman, B. (2012) "The effect of segregation on transport and durability properties of self-consolidating concrete" <i>Cement and Concrete Research</i> V42 (2), 252-264.
[Park, 2005]	Park, Noh et Park, (2005), "Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures", <i>Cement and concrete research</i> , vol 35, pp 842-849.
[Pedersen, 2003]	Pedersen et Smeplass, (2003), "The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase", <i>Proceedings of the third international RILEM conference on SCC</i> , Reykjavik, Islande, pp 106-116.
[Philippidis-a, 2003]	Philippidis T.P. and Aggelis D.G., 2003, an acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. <i>Cem. Concr. Res.</i> , 33:525–538.
[Philippidis-b, 2005]	Philippidis T.P. and Aggelis D.G., 2005, Experimental study of waves dispersion and attenuation in concrete. <i>Ultrasonics</i> , 43:584–595.

[Pierre ; 2000]	Pierre B, Pierre H, Jean-Paul S, Gérard V., 2000. Manuel de Mécanique des roches. Les Presses de l'École des Mines, pp 42-47.
[Piwakowski, 2003]	Piwakowski B., Ffine A., Goueygou M., and Buyle-Bodin F., 2004, Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples. Ultrasonics, 42 :395–402.
[Piwakowski, 2003]	Piwakowski B., Safinowski P., and Kosecki A., 2008, Contrôle non destructif du béton par ultrasons à l'aide d'un dispositif automatisé. In Actes des journées COFREND, Toulouse, France.
[Plona, 1980]	Plona, T. J., 1980, Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies," Appl. Phys. Lett., vol. 36, p. 259.
[PNC, 2001]	PNC, (2001), « formulation et suivi rhéologique des bétons-la méthode MBE » Projet National Calibré-fabrication du béton, IREX, 25 pages.
[Popovics-a, 1996]	Popovics J.S., 1996, Comment on "Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves" [J. Acoust. Soc. Am. 98, 2142-2148 (1995)]. J. Acoust. Soc. Am., 100 (5):3451-3453.
[Popovics-b, 1990]	Popovics, S., Rose, J.L., and Popovics, J.S. (1990), "the behavior of ultrasonic pulses in concrete", Cem. Concr. Res., 20, 259.
[Powers, 1986]	Powers, (1968), "Properties of Fresh concrete", éditions Wiley, 664 pages.
[Powers, 1946]	Powers, T. C. and T. L. Brownyard (1946), "Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste," CIJournal, Proc, 43.
[Prada, 2005]	Prada C., Balogun O. and Murray, 2005, Laser-based ultrasonic generation and detection of zero-group velocity Lamb waves in thin plates. Appl. Phys. Lett., 87.
[Puech, 2004]	Puech, X. Rivoallan, and ChereL L., 2004, the use of surface waves in the characterisation of seabed sediments: development of a MASW system for offshore applications. In Colloque "Caractérisation in situ des fonds marins", Seatech week, Brest, France.
[Qixian, 1996]	Qixian L. and Bungey J.H., 1996, Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. Constr. Build. Mater., 10(4) :237–242.
[Rakesh, 2015]	Rakesh K. et al., (2015) "Self-Compacted Concrete Mix Design and its Comparison with Conventional Concrete (M-40), J. Civil Environ Eng. 5(3), 5: 176.
[Ramachandran, 1995]	Ramachandran V. S. (1995), 'Concrete Admixtures Handbook-Properties, Science, Technology', Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA.
[Rauch, 1980]	Rauch. D., 1980, <i>Seismic interface waves in coastal waters: A review</i> . SACLANT ASW.
[Regourd, 1982]	Regourd M. (1982), 'L'hydratation du ciment portland dans les bétons hydrauliques : connaissance et pratique', Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
[RILEM, 1973]	RILEM, (1973), Tests on the concrete by the method of the ultrasonic testing: recommendation of RILEM, Annals of the Technical Institute of the Building and Public Works, Series: Test and Measurements, No. 142.
[RILEM, 2010]	RILEM, (2010), "Production and Placement of Self-Consolidating Concrete", (eds.), Design Book series 1, DOI 10.1007/978-90-481-9664-7_18,
[Rols, 1999]	Rols S., Ambroise J., Péra J., (1999) "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete". Cem. Concr. Res., 29(2) :261–266
[Rooney, 2001]	Rooney, M.J. et al. (2001), "Development of the settlement column segregation test for fresh self-compacting concrete". In: Ozawa K, Ouchi M (eds) Self-Compacting Concrete. 2nd international symposium on self-compacting concrete, Tokyo. COMS Engineering Corporation, Fukui Kochi, p109.
[Roy, 1993]	Roy, D. M., P. W. Brown, D. Shi, B. E. Scheetz and W. May, (1993), Concrète Microstructure - Porosity and Permeability, SHRP-C-628, Materials Research Laboratory - The Pennsylvania State University
[Saak, 2001]	Saak et al., 2001, New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete, ACI Materials Journal, pp 429-439.
[Safinowski, 2007]	Safinowski P., Piwakowski B., Balayssac J-P., Goueygou M., Kosecki A., 2007, contrôle non destructif du béton par ultrason à l'aide d'un dispositif automatisé, IEMN DDOAE UMR CNR 8520, Ecole centrale de Lille. Laboratoire (LMDC INSA-UPS), France.
[Sanish, 2012]	Sanish K.B., Manu S., (2012) "Characterization of Strength Development of Concrete Using Ultrasonic Method" 18th World Conference on Non-destructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.

[Schubert, 2001]	Schubert F., Koehler B., 2001. Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity, <i>Journal of Computational Acoustics</i> , Vol. 9, No. 4, pp. 1543-1560.
[Schwhdenmann, 2005]	Schwdenmann, G. and al., (2005), Study of segregation in self-compacting concrete walls using gamma densitometry, 2nd North American Conference on the design and use of self-consolidating concrete and the 4th International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Oct 30-Nov 02, Chicago, USA.
[Sedran, 1999]	Sedran, (1999), « Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants », thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 220 pages.
[Selleck, 1998]	Selleck, S.F., Landis, E.N., Peterson, M.L., Shah, S.P., Achenback, J.D. (1998). Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage. <i>ACI Materials Journal</i> , vol. 95, no. 1, pp.27-36.]
[Shi, 1998]	Shi et al., (1998), "A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 20, pp 9-14.
[Shindoh, 2003]	Shindoh et Matsuoka, (2003), "Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods", <i>Journal of Advanced Concrete technology</i> , vol 1, n°1, pp 26-36.
[Sidky, 1981]	Sidky M, Legrand C, Barrioulet M (1981) "Influence of the concentration in aggregate and vibration time on internal segregation in fresh concrete". <i>Mat Struct</i> 14 (83) :367-377.
[Sierra, 1982]	Sierra, R., (1982), "Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C3S et de ciment Portland," <i>Bulletin de Liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées</i> , 117, 77-81.
[Silva, 2013]	Silva, P. and Brito, J. (2013), "Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler", <i>Adv. Concrete Constr.</i> , 1(1), 65-84.
[Sonebi, 2005]	Sonebi M. (2005), "Evaluation of the Segregation Resistance of Fresh Self-Compacting Concrete using different test methods" Conference Paper • DOI: 10.1617/2912143624.031.
[Su, 2003]	Su et Miao, (2003), "A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content", <i>Cement and concrete composites</i> , vol 25, pp 215-222.
[Sugamata, 1999]	Sugamata, et al., (1999), "A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 21, pp 7-14.
[Tangtermsirikul, 2000]	Tangtermsirikul et al, (2000), <i>Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés</i> , thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 132 pages.
[Taylor, 1990]	Taylor H., (1990), 'Cement Chemistry', London.
[Tazawa, 1995]	Tazawa, E., S. Miyazawa and T. Kasai, (1995), "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste", <i>Cement and Concrete Research</i> , 25, 2, 288-292.
[Toutou, 2002]	Toutou, (2002), « Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité », thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Rennes, 221 pages.
[Tribikram, 2014]	Tribikram K. (2014) Ultrasonic and Electromagnetic Waves for Nondestructive Evaluation and Structural Health Monitoring. 1st International Conference on Structural Integrity, Dep. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Dep. of Aerospace and Mechanical Engineering University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA.
[Ulm, 2001]	Ulm F.J., Bazant Z. et Wittmann F., (2001), eds: 'Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials' Cambridge, USA, Elsevier. TAYLOR H., (1990), 'Cement Chemistry'. London.
[Uysal, 2012]	Uysal M, Yilmaz K, Ipek AM.,(2012), "The effect of mineral admixtures on mechanical proper- ties, chloride ion permeability and impermeability of selfcompacting concrete. <i>Construction and Building Materials</i> 27, pp 263-270.
[Vakhshouri, 2016]	Vakhshouri and Nejadi, (2016), "Self-compacting light-weight concrete; mix design and proportions. <i>Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal</i> 58, pp143-161.
[Van Breugel-a, 2001]	Van Breugel, K., (2001), 'Stress prédictions in hardening concrète', The rôle of microstructural development, IPACS Report.
[Van Breugel-b, 2001]	Van Breugel, K., (2001), Hydration of Cement-Based Systems. Aspects of hydration of cement-based Systems and possibilities to quantify the évolution of hydration processes, IPACS report 2.1-T1, Sweden, Department of Civil & Mining Engineering Division of Structural Engineering

[Van Breugel, 1995]	Van Breugel, K., (1995), «Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cement-based materials (I) Theory," <i>Cement and Concrete Research</i> , 25, 2, 319-331.
[Van Bui-a, 1999]	Van Bui et Montgomery, (1999), "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume", <i>Proceedings of the 1st international RILEM Symposium</i> , Stockholm, pp 373-384.
[Van Bui-b, 2002]	Van Bui, Akkaya et Shah, (2002), "Rheological model for self-compacting concrete", <i>ACI Materials Journal</i> , vol 99, n°6, pp 549-559.
[Vergara, 2001]	Vergara L., Miralles R., Gosálbez J., Juanes F.J., Ullate L.G., Anaya J.J., Hernández M.G., and Izquierdo M.A.G., 2001, NDE ultrasonic method to characterize the porosity of mortar. <i>NDT&E International</i> , 34:557-562.
[Vernet, 1991]	Vernet C., Cadoret G., (1991), ' Voies nouvelles du béton, suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances, Cachan, France.
[Villain, 2008]	Villain G., Derobert X., Abraham O., Chekroun M., Coffec O., and Durand O., 2008, Complémentarités de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques. In <i>Actes des journées COFREND</i> , Toulouse, France.
[Wallevik, 2003]	Wallevik, (2003), "Rheology; A scientific approach to develop self-compacting concrete", <i>Proceedings of the third international RILEM conference on SCC</i> , Reykjavik, Islande, 23-31.
[Walton, 1987]	Walton K. W., 1987, the effective elastic moduli of a random packing of spheres," <i>J. Mech. Phys. Solids</i> , vol. 35, no. 2, pp. 213-226.
[Waterman, 1961]	Waterman, R. Truell., (1961) Multiple scattering of waves, <i>Journal of Mathematical Physics</i> , Vol. 2, No. 4, pp. 512-537.]
[Winkler, 2003]	Winkler K. W., 1983 Contact stiffness in granular porous materials: comparison between theory and experiment," <i>Geophys. Res. Lett.</i> , vol. 10, no. 11, pp. 1073-1076.
[Winkler, 2003]	Winkler K. W., 1983 Contact stiffness in granular porous materials: comparison between theory and experiment," <i>Geophys. Res. Lett.</i> , vol. 10, no. 11, pp. 1073-1076.
[Wittmann-a, 1968]	Wittmann, F. H., (1968), "Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste," <i>Matériaux et Constructions</i> , 1, 6, 547-552.
[Wittmann-b, 1980]	Wittmann, F. H., (1980), ' Propriétés de la pâte de ciment durcie', 7ème congrès international de la chimie des ciments, Paris, Septima, 1.
[Wu, 1995]	Wu T.T., Fang J.S., Liu G.Y., and Kuo M.K., 1995, Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves. <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> , 98(4) :2142.
[Xie, 2002]	Xie Y, Liu B, Yin J, Zhou S (2002). Optimum mix parameters of high strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash, <i>Cement Concrete Res</i> .32: 477-480.
[Ye-a, 2005]	Ye, G., (2005), "Percolation of capillary pores in hardening cement pastes," <i>Cement and Concrete Research</i> , 35,167-176,
[Ye-b, 2004]	Ye, G., P. Lura, K. van Breugel and A. L. A. Fraaij,(2004), "Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement," <i>Cement and Concrete Composites</i> , 26,491-497,
[Yen, 1999]	Yen et al., (1999), "Flow behaviour of high strength high-performance concrete", <i>cement and concrete composites</i> .
[Zhou, 1995]	Zhou F.P., Lydon F.D., and Barr B.I.G., 1995, Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. <i>Cem. Concr. Res.</i> , 25(1) :177-186.
[Zhu, 2001]	Zhu W., Quinn J., and Bartos PJM., (2001), Transport properties and durability of self-compacting concrete. <i>Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete</i> , Tokyo, Japan, pp 451-458.
[Zhu, 2005]	Zhu et Gibbs, (2005), "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete", <i>Cement and concret research</i> , vol 35, pp1457-1462.

#

Annexes

Annexe 1 Formulation du béton

Composition

On fixe le dosage en gros granulats à 50% de sa compacité et celui de sable à 40% du volume totale du mortier :

La composition de la pâte est déduite à partir des paramètres Eau /liant et fillers/liant.

Détermination du dosage en gravier :

Masse volumique apparente : $m_{app}^v =$

Masse volumique absolue : $m_{abs}^v =$

Compacité : $\gamma = \frac{m_{app}^v}{m_{abs}^v} =$

Dosage volumique en gravier : $D_g^v = 50\% \cdot \gamma =$

Dosage pondérale :

Détermination du dosage en sable

$D_s^v = 40\% \cdot V_m =$

$V_m(\text{litres}) = (1000 - g) = s + c + sp + eg + v$

Dosage volumique en sable : $D_s^v = 0.40(1000 - g)$

Dosage pondérale :

Optimisation de la composition du mortier →

Le dosage volumique du ciment.

$$c = \frac{1000 - g - s - v}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \frac{a}{1-a} + \left(\frac{\rho_c}{\rho_{sp}} \cdot b(1 + k^1) + d \cdot \rho_c \right) \left(1 + \frac{a}{1-a} \right)}$$

1^{er} étape,

On fixe $E/L = 0,48$ pour les bétons N AP

Et $E/L = 0,32$ pour les bétons AP

g ; Volume granulats.

S ; Volume sable.

c ; Volume ciment.

f ; Volume fillers.

sp ; Volume super-plastifiant.

eg ; Volume eau de gâchage.

v ; Volume des vides.

C, F, Eg, Sp : dosages pondérale des ; ciment, filler, eau de gâchage et de super plastifiant.

ρ_c ; Masse volumique absolue du ciment.

ρ_f ; Masse volumique absolue du filler

ρ_{sp} ; Masse volumique absolue du super plastifiant.

$$E = E_g + E_{sp} = E_g + ksp$$

$$a = \frac{F}{C + F} = \frac{\rho_f \cdot f}{\rho_c \cdot c + \rho_f \cdot f}$$

$$b = \frac{Sp}{C + F} = \frac{\rho_{sp} \cdot Sp}{\rho_c \cdot c + \rho_f \cdot f}$$

$$d = \frac{E}{C + F} = \frac{E_g \cdot ksp}{\rho_c \cdot c + \rho_f \cdot f}$$

¹ L'eau totale « E » est la somme de l'eau de gâchage E_g et de l'eau contenue dans le super-plastifiant E_{sp} . On a donc : $E = E_g + E_{sp}$ et $E_{sp} = k \cdot SP$. La masse d'extrait sec du super-plastifiant est de l'ordre de 40%, et donc $k = 0,6$.

2^{ème} étape,

Le dosage en super plastifiant, est le dosage de saturation.

Suite aux travaux réalisés dans l'université de Constantine [Bensebti, 2008], il a été remarqué que le dosage en saturation du liant, est en relation avec les proportions de ciment et de fillers adoptés. Cette relation qui semble linéaire et obéit à la relation suivante :

$$\text{Avec : } \quad \text{SP} = F \times \text{SP}_F + C \times \text{SP}_C$$

SP le dosage de saturation du mélange F+C,

SP_F = 0,8%, dosage de saturation du coulis de filler

et SP_C = 2%, le dosages de saturation de ciment,

C et F sont les proportions rapportées à l'unité du ciment et du fillers dans le mélange.

Le dosage volumique du ciment.

$$c = \frac{1000 - g - s - v}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \frac{a}{1-a} + \left(\frac{\rho_c}{\rho_{sp}} \cdot b(1+k) + d \cdot \rho_c \right) \left(1 + \frac{a}{1-a} \right)}$$

Dosage pondérale **du ciment** :

Béton	Composition en kg/m ³								
	G (5-15 mm)	S (0-5 mm)	Ciment (C)	Fillers (F)	Eau (W)	Super- Plastifiant(S _p)	a* = F/L (%)	b* = S _p /L (%)	d* = E/L (%)
C01	775	736	495	0.0	237.8	9.91	0.00	2.00	48
C02	775	736	477	24	235.2	9.71	4.76	1.94	47
C03	775	736	460	46	232.5	9.50	9.09	1.88	46
C04	775	736	457	55	230.2	9.49	10.71	1.86	45
C05	775	736	454	64	227.8	9.48	12.28	1.83	44
C06	775	736	452	72	225.3	9.47	13.79	1.81	43
C07	775	736	450	81	222.8	9.46	15.25	1.78	42
C08	775	736	429	107	219.8	9.11	20.00	1.70	41
C09	775	736	618	0.0	198.0	12.35	0.00	2.00	32
C10	775	736	577	29	200.0	11.76	4.76	1.94	33
C11	775	736	550	55	200.0	11.37	9.09	1.88	33
C12	775	736	528	84	196.0	11.06	13.79	1.81	32
C13	775	736	509	102	195.0	10.75	16.67	1.76	32
C14	775	736	488	122	195.0	10.36	20.00	1.70	33

* [L; Liant, (a=F/L); Dosage filler/Liant, (b=Sp/L); Dosage super plastifiant /Liant, (d=E/L); Dosage eau/Liant.]

La variation de la composition concerne le dosage en fillers " $a = F/L$ " variant de 0% à 25% du liant, le dosage en super-plastifiant " $b = Sp/L$ " variant de 1.70 à 2,00% du liant et le dosage en eau " $d = E/L$ " variant de 32 à 48 % du liant (le liant comprend le ciment et les fillers).

Remarque :


Les propriétés essentielles des BAP frais sont :

→ *Une excellente Fluidité (an Excellent deformability)*

→ *Une bonne stabilité (a good sability)*

(Par stabilité on entend ; la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage).

→ *Un risque minime de blocage (alow risque of blockage)*

		قشش نين مبرلدا راجل ديورلدا FICHE TECHNIQUE CIMENT			F03-01/1000	
		Date : 31/05/ 2009	Version : 02	Page 1 sur 1		

CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ-CEMII/A 42,5

MARS 2011

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE		
ELEMENTS	% EN MASSE	NORME NA			NORME NA	EN Mpa	
PAF 975°C	1 - 2	NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	NA 442	COMPRESSION	
CaO	55 - 65	NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60		02 jours	≥ 12,50
SiO ₂	22 - 28	NA230	FIN DE PRISE	150 - 250		07 jours	25 - 35
Al ₂ O ₃	5 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		28 jours	42,5 - 52,5
Fe ₂ O ₃	3 - 3,6	NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000	NA 234	FLEXION	
MgO	1 - 2	NA231				02 jours	3,0-4,0
K ₂ O	0,3 - 0,6					07 jours	5,0-6,5
Na ₂ O	0,1 - 0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000		28 jours	6,5-8,5
SO ₃	1,8 - 2,5	COPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS			
CaOL	0,8 - 1,8	C3S	55 - 65	CLINKER	≥ 74		
CL ⁻	0 - 0,01	C2S	10 - 25	GYPSE	4 - 6		
		C3A	8 - 12	CALCAIRE	0		
		C4AF	9 - 13	LAITIER	≤ 20		


DOMAINE D'UTILISATION
 Utilisation courante de notre ciment :
 • Fondations (béton de propreté et béton de semelle en milieux non agressifs).
 • Ouvrage en béton armé (Murs, Linteaux, Poteaux et dalle de compressions).
 • Dallage en béton, Montage de mure et maçonnerie et Scellemnts de carrelage (Dalles, pierres et carrelage)
 • Chape (mortier de ciment).

PRECAUTION D'EMPLOI
 Ce type de ciment ne convient pas pour :
 • Ouvrages en milieux agressifs (terrains gypseux, sulfates, eaux industriels) emploi obligatoire de ciment ES pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
 • Travaux à la mère (emploi obligatoire de ciment PM pour travaux à la mer).
 • Bétonnage au dessous de 5° C (il est conseillé d'utiliser des ciments de résistance initiale élevée R)

STOCKAGE :
 Eviter :
 • Un stockage prolongé au-delà de trois (03) mois.
 • Un stockage dans des endroits humides.

EMBALLAGE :
 • Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis, le système de fermeture garantie l'inviolabilité du sac.

ATTENTION
 • Un contact prolongé du ciment avec la peau peut être irritant.


S.O.H.S.
 Cimenterie de HADJAR-SOUD
 SERVICE RECEPTION CONTRÔLE QUALITE

Annexe 3 Composition chimique et caractéristiques physiques du filler

Les Fillers : Les additions utilisées dans ce travail sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80 μ m, des fillers calcaire, de provenance ENG d'El Khroub, noté UF ; dont les principales caractéristiques que nous présentons proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG.

Tableau. A2.1-Composition chimique du filler calcaire

Composant	Teneur en %	Composant	Teneur en %
SiO ₂	0.06	Al ₂ O ₃	0.09
Fe ₂ O ₃	0.02	CaCO ₃	99
MgO	0.01	SO ₃	0.01
Perte au feu	43.8	PH	9

Tableau. A2.2- Caractéristiques physiques des fillers

Fillers	Poids spécifique	Densité apparente	Blancheur	Prise d'huile	Humidité
UF20	2.7 Kg/l	1.23	92%	18%	0.1%

Pour les morphologiques du filler calcaire utilisé, le diamètre moyen des grains des fillers « diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieur » est de l'ordre 19 μ . 98% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 200 μ , et 26% un diamètre inférieur à 10 μ .

Tableau. A2.3-Référence



ENG
LABORATOIRE CENTRAL
Rapport d'analyse

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : 34355-63

File name: PRODUITS ETRANGERS
Record Number: 84
02/08/2012 10:49:32

NOTICE TECHNIQUE

2 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1 et 3.2, NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

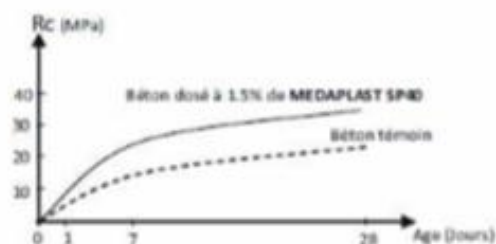
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore < 1g/L
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** 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 été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée : 0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

PRÉCAUTIONS 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 Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la technique d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique

Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par : GRINI Abdelouaheb

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Contribution à l'étude de la ségrégation du béton fluide (Caractérisation par les ultrasons)

Devant le jury :

Pr. BENMALEK M. Larbi	Président	Université 8 Mai 1945	Guelma
Pr. BENOUIS Abdelhalim	Rapporteur	Université 8 Mai 1945	Guelma
Pr. CHERAIT Yacine	Examineur	Université 8 Mai 1945	Guelma
Pr. BELACHIA Mouloud	Examineur	Université 20 Aout 1955	Skikda
Pr. ARABI Nouredine	Examineur	Université Badji Mokhtar	Annaba
Pr. Naceri Abdelghani	Examineur	Université Mohamed Boudiaf	M'sila.

Soutenu le 02-05-2019

#

Remerciements

La présente étude a été réalisée au sein du département de Génie Civil et Hydraulique (GCH), Faculté des Sciences et de la Technologie à l'Université de Guelma. Elle a été rendue possible grâce à de nombreuses personnes que je voudrais remercier sincèrement.

Je tiens d'abord à remercier vivement monsieur le professeur Benouis Abdelhalim, mon directeur de thèse, pour son encadrement au cours de cette thèse et qui a eu toujours un grand enthousiasme à l'égard de ce travail. Il m'a transmis ses expériences scientifiques précieuses.

Je remercie vivement messieurs le professeur Guenfoud Mohamed, doyen de la faculté des sciences et de la technologie, le professeur Belabed Lazhar, chef du département de génie civil, et tous les enseignants du département, pour leurs aides précieuses.

Je voudrais ensuite exprimer ma profonde reconnaissance aux membres du jury : les professeurs Benmalek M. Larbi et Cherait Yacine de l'université de Guelma, les professeurs Arabi Noureddine et Naceri Abdelghani de l'université de M'sila ainsi que le professeur Belachia Mouloud de l'université de Skikda, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de constituer le jury et d'examiner le travail de ma thèse.

Je remercie le professeur Nouaouria M. Salah directeur du LGCH et tous les doctorants et personnels que j'ai rencontré au sein du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH. L'ambiance sympathique qui règne au sein de ce laboratoire constitue indéniablement l'une des clefs de l'aboutissement de ce travail.

Un grand merci à ma femme et à mon fils Oussama pour leur soutien et fidélités inestimables.

Enfin je voudrais adresser toute ma gratitude à ma grande famille, et plus particulièrement à mes parents, qui m'ont soutenu durant toutes mes longues années d'études.

Merci à tous !

TABLE DES MATIERES		
#	Remerciements	-
#	Résumé, ملخص, Summary	01
#	Introduction	04
#	Organisation du mémoire	07
Chapitre I. Propriétés des bétons frais.		
I.1-	Introduction	09
I.2-	Description du mécanisme de l'hydratation du ciment.	10
I.2.1-	Hydratation du silicate tricalcique « C3S ».	11
I.2.2-	Hydratation des aluminates.	14
I.2.3-	Prise du ciment.	15
I.2.4-	Réseau poreux	15
I.2.5-	Evolution de la porosité	15
I.2.6-	Conclusion	18
I.3-	Fluidité et ségrégation des bétons.	18
I.3.1-	Aspects théoriques	18
I.3.1.1-	Mouvement des particules dans des fluides.	18
I.3.1.2-	Mouvement d'une particule dans un fluide à seuil.	20
I.3.1.3-	Cas de plusieurs particules sphériques	22
I.4-	Fluidité des bétons.	22
I.4.1-	Caractérisation empirique.	22
I.4.2-	Mesures rhéologiques.	23
I.4.3-	Corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques.	26
I.4.4-	Mécanismes générant la fluidité.	28
I.4.4.1-	Théorie de l'excès de pâte.	28
I.4.4.2-	La phase fluide d'un béton.	31
I.5-	La ségrégation des bétons.	34
I.5.1-	Problème de la ségrégation.	34
I.5.2-	Ségrégation sous vibrations.	34
I.5.3-	Ségrégation en écoulement.	34
I.5.4-	Ségrégabilité.	35
I.6-	La caractérisation de la ségrégation.	36
I.6.1-	Introduction.	36
I.6.2-	Essais de caractérisation de la ségrégation.	36
I.6.2.1-	Ségrégation dynamique.	36
I.6.2.1.1-	Essais de caractérisation de l'aptitude au remplissage des bétons.	36
I.6.2.1.1.1-	Mesures rhéologiques au cône d'Abrams.	36
I.6.2.1.1.2-	Essais de caractérisation de la capacité de passage des bétons.	38
I.6.2.1.2.1-	L'essai à la L-Box.	38
I.6.2.1.2.2-	L'essai à la boîte en U (U-Box).	39
I.6.2.1.2.3-	L'essai J-ring.	39
I.6.2.2-	Ségrégation statique.	40
I.6.2.2.1-	Essai au tamis.	41
I.6.2.2.2-	Essai au cylindre.	42
I.6.2.2.3-	Essai à la colonne.	43

I.6.2.2.4-	Essai sur une colonne sans vibration.	44
I.6.2.2.5-	Essai à la bille.	44
I.6.2.2.6-	Essai à la palette	45
I.6.2.2.7-	Conclusion sur les essais disponibles.	45
I.7-	Conclusion	47
Chapitre II. Propagation des ondes ultrasoniques dans les milieux hétérogènes du génie civil.		
II.1-	Introduction	48
II.2-	Généralités sur les ondes ultrasonores	49
II.2.1-	Principe	49
II.3-	Equipement pour test de vitesse d'impulsion	54
II.4-	Forme et taille de l'échantillon	54
II.5-	Utilisation de transducteurs	54
II.6-	Auscultation sonique	55
II.7-	Les différents types des ondes ultrasonores	56
II.7.1-	Vibrations longitudinales	57
II.7.2-	Autres types d'ondes.	57
II.8-	Sensibilité des ondes de volume à la granulométrie et la composition des bétons.	59
II.8.1-	Influence du rapport E/C	59
II.8.2-	Influence du taux de saturation	59
II.8.3-	Influence des inclusions rocheuses (sables et granulats)	60
II.9-	Conclusion	61
Chapitre III. Méthodologie expérimentale		
III.1-	Procédure expérimentale	63
III.1.1-	Essais de stabilité au tamis	63
III.1.2-	Essais de stabilité à la colonne	64
III.1.3-	Procédé de test ultrasonique	65
III.2-	Matériaux utilisés	68
III.3-	Formulation des bétons d'étude	70
III.3.1-	Détermination des paramètres de formulation	71
III.4-	Composition des bétons.	72
III.4.1-	Dosage des granulats	72
III.4.2-	Vérification des compositions	73
III.4.2.1-	Gâchées d'essais et caractérisation des bétons	73
III.5-	Procédures des Essais.	77
III.5.1-	Caractérisation des bétons frais.	77
III.5.2-	Caractérisation de la ségrégation.	79
III.5.3-	Mesure des vitesses ultrasoniques	79
III.6-	Conclusion	79
Chapitre IV. Synthèse et interprétation des résultats		
IV.1-	Introduction.	82
IV.2-	Présentation des résultats	82
IV.2.1-	L'ouvrabilité	83
IV.2.2-	L'indice de ségrégation au tamis	84

IV.2.3-	L'indice de ségrégation à la colonne	84
IV.2.4-	L'indice ultrasonique de ségrégation	85
IV.2.5-	Conclusion	86
IV.3-	Effet de la composition sur les indices de ségrégation des bétons	87
IV.3.1-	Effet de du rapport E/L	87
IV.3.2-	Effet de du rapport F/L	90
IV.4-	Relations entre l'étalement et les indices de ségrégation	95
IV.5-	Corrélations entre les différents indices de ségrégation des bétons	99
IV.5.1-	Corrélations entre les indices au tamis et à la colonne	99
IV.5.2-	Corrélations entre les indices au tamis et ultrasonique	99
IV.5.3-	Corrélations entre les indices ultrasonique et à la colonne	100
IV.6-	Conclusions	102
Conclusions et perspectives		
#.1-	Conclusion générale	103
#.2-	Perspectives	105
Table de références		106
Annexes		
#A.1-	Formulation du béton	116
#A.2-	Composition chimiques et physiques du ciment	119
#A.3-	Composition chimiques et physiques du filler calcaire	120
#A.4-	Composition chimiques et physiques du super plastifiant	121

LISTE DES FIGURES

Figure I.1-	Image obtenue au MEB, de Portlandite dans la matrice d'un ciment.	11
Figure I.2-	Image obtenue au MEB, de l'ettringite aciculaire (aiguille) dans un ciment.	11
Figure I.3-	Evolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte silicate tricalcique(C3S).	13
Figure I.4-	Courbe calorimétrique typique reliant le taux de libération de la chaleur d'hydratation du <i>ciment</i> avec le temps [Vernet et Cadoret, 1991].	13
Figure I.5-	Représentation du caractère hétérogène d'un béton par la somme d'un squelette (Matrice solide + réseau poreux) et de fluides saturant l'espace poreux.	16
Figure I.6-	Evolution expérimentale en fonction du temps de la distribution poreuse d'une pâte de ciment (E/C = 0.4), maintenue à 24 °C, par intrusion au, tiré de [Brown et al. 1993] dans [Roy et al. 1993].	17
Figure I.7-	Particule sphérique rigide immergée dans un fluide est soumise à différentes forces	19
Figure I.8-	Champ d'écoulement autour d'une sphère immergée dans un fluide à seuil [Saak et al. 2001]	22
Figure I.9-	Essai d'étalement au cône d'Abrams	23
Figure I.10-	Modèles rhéologiques	24
Figure I.11-	Modèle de Bingham modifié [de Larrard et al ,1998]	25
Figure I.12-	Relation entre l'étalement et le seuil d'écoulement rapporté à la masse volumique (notée M) [Wallevik, 2003].	26
Figure I.13-	Comparaison entre des points expérimentaux et différentes expressions permettant de déterminer le seuil d'écoulement à partir de l'étalement [Jin, 2002]	27
Figure I.14-	Dispersion des granulats par excès de pâte.	28
Figure I.15-	Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton. [Yen et al, 1999].	28
Figure I.16-	(a) Mécanisme de déformation du mortier sous l'action du rapprochement des granulats, (b) Comparaison entre l'étalement du béton et celui du mortier en fonction de la fraction volumique de sable contenue dans le mortier.	29
Figure I.17-	Relation entre le seuil d'écoulement de la matrice cimentaire et la quantité de pâte requise pour obtenir un étalement de 650 mm [Pedersen et Smeplass, 2003].	30
Figure I.18-	Evolution du seuil d'écoulement et du saut de force normale en fonction de la fraction volumique de pâtes de C3S [Mansoutre, 2000]	31
Figure I.19-	(a) Corrélation entre l'étalement d'un béton et celui de son mortier. (b) corrélation entre l'étalement du béton et le seuil d'écoulement de son mortier.	33 33
Figure I.20-	Corrélation entre l'étalement d'un MBE et l'affaissement du béton et dimensions du cône MBE, homothétique du cône d'Abrams [PNC, 2001]	33
Figure I.21-	Figures de digitation observées au front d'un écoulement contenant des grosses particules.	34
Figure I.22-	Dispositif d'essai de mesure de la fluidité du béton : le cône d'Abrams.	37
Figure I.23-	Essais d'écoulement à travers des armatures « a la L-Box ».	38
Figure I.24-	Essais d'écoulement à travers des armatures « a la U-Box ».	39
Figure I.25-	Essais d'écoulement à travers des armatures « a la J-ring».	40
Figure I.26-	Essai de stabilité au tamis	41
Figure I.27-	Essai au cylindre, [Van Bui et al.2002].	42
Figure I.28-	Essai de stabilité à la colonne [RILEM.TC145]	43
Figure I.29-	Essai à la bille, [Trudel, 1995]	44
Figure I.30-	Essai d'extraction d'une palette métallique [Tangtermsirikul et al, 1991]	45
Figure II.1-	Échelle des ondes élastiques [D'après (Jacques, 2012)].	50
Figure II.2-	Diffusion par une hétérogénéité (D'après [Marie, 2006] et [Cuxac, 1991]).	52
Figure II.3-	Propagation et polarisation des ondes longitudinales et transversales (D'après [Marie 2006]).	56
Figure II.4-	Emplacement des transducteurs dans l'éprouvette	57
Figure II.5-	Propagation Longitudinale d'une onde acoustique	58
Figure II.6-	Propagation transverse d'une onde acoustique	58

Figure II.7-	Variations de l'atténuation des ondes P pour différents D_{max} , prises à différents endroits des spécimens, d'après [Landis and Shah ,1995].	61
Figure III.1-	a-Essai au tamis et critère de stabilité (ressuage à la surface) b-Critère de stabilité de l'essai au tamis	64
Figure III.2-	a-Dispositif de l'essai à la colonne b-Critère de stabilité de l'essai à la colonne	65
Figure III.3-	a-Essais ultrasoniques et critère ultrasonique de stabilité b- Dispositif utilisé pour la caractérisation ultrasonique de la ségrégation (LGCH, université de Guelma, Algérie)	66 66
Figure III.4-	Procédure de la détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons " f_u "	68
Figure III.5-	Courbes granulométriques du filler utilisé [ENG, 2012].	69
Figure III.6-	Courbes granulométriques des granulats utilisés	70
Figure III.7-	Procédures de caractérisation de la ségrégation des bétons	78
Figure III.8-	Evaluation visuelle de la stabilité apparente des bétons	78
Figure IV.1-	Diamètres d'étalement (Sf) des différents bétons.	83
Figure IV.2-	a- Indices de stabilité au tamis (π) b- Masses des gros granulats des différentes parties de la colonne. c- Vitesses ultrasoniques à travers les deux parties de la colonne	84 85 86
Figure IV.3-	Indices de ségrégation des différents bétons (tamis, colonne et UPV)	87
Figure IV.4-	a. Evolution de l'étalement en fonction du rapport E/L. b. Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport E/L. c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport E/L. d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport E/L.	88 88 89 89
Figure IV.5-	Evolution des indices de ségrégation (f_u , f et π) avec le rapport E/L.	90
Figure IV.6-	a. Evolution de l'étalement en fonction du rapport F/L. b. Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport F/L. c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport F/L. d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport F/L.	91 92 92 93
Figure IV.7-	Evolution des indices de ségrégation (π , f et f_u) avec le rapport F/L.	94
Figure IV.8-	a. Evolution de l'indice de stabilité au tamis en fonction du diamètre de l'étalement. b. Evolution de l'indice de ségrégation à la colonne en fonction du diamètre de l'étalement. c. Evolution de l'indice ultrasonique de ségrégation en fonction du diamètre de l'étalement.	95 96 96
Figure IV.9-	a. Relations entre l'écart type et les diamètres de l'étalement. b. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité à la colonne d. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité ultrasonique	97 98 98
Figure IV.10-	Relations entre les indices de stabilité au tamis (π) et de stabilité à la colonne (f)	99
Figure IV.11-	Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité au tamis (π)	100
Figure IV.12-	Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité à la colonne (f).	101
Figure IV.13-	Relations entre l'indice de stabilité au tamis (π) et les indices de ségrégation à la colonne et ultrasonique (f , f_u)	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. I.1-	Classification des pores dans la pâte de ciment hydraté [Young et coll. 1986].	16
Tableau. II.1-	Effect of specimen dimension on pulse transmission [Ould-Naffa et al. 2002]	55
Tableau. III.1-	Propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés.	69
Tableau.III.2-	Composition des bétons d'essai	73
Tableau.III.3-	a. Evolution de l'étalement du béton B1	74
	b. Evolution de l'étalement du béton B2	74
	c. Evolution de l'étalement du béton B3	74
	d. Paramètres de formulation et caractéristiques des bétons corrigées et ajustées	75
Tableau. III.4-	Dosage en fillers des bétons.	76
Tableau. III.5-	Compositions des mélanges testés.	76
Tableau. IV.1-	Les différents indices de ségrégation des bétons	82
Tableau. IV.2-	Résultats des essais de stabilité au tamis.	84
Tableau. IV.3-	Résultats des essais de ségrégation à la colonne	85
Tableau. IV.4-	Résultats des essais ultrasoniques	86

Résumé

La famille des bétons s'enrichit régulièrement depuis quelques années avec des bétons aux nouvelles performances, comme les bétons auto-plaçant (BAP) et autres. La majorité des auteurs s'accordent sur la nécessité de recourir à au moins deux essais empiriques différents pour établir des relations entre grandeurs spécifiques et caractéristiques rhéologiques des bétons pour caractériser d'une manière fiable le comportement du béton lors de l'écoulement.

La ségrégation est une de ces caractéristiques rhéologiques, elle se manifeste par la séparation involontaire des composants frais du béton ou du mortier. Elle peut avoir des impacts négatifs sur les propriétés mécaniques, le transport et la durabilité du produit durci. Ce travail étudie la possibilité de l'utilisation d'une technique non destructive "la vitesse d'impulsion ultrasonore (VIU)" comme moyen de caractériser la ségrégation dans le béton fluide et le béton auto-plaçant (BAP), ce dernier connue pour être particulièrement sujet à la ségrégation, à cause de son niveau de fluidité élevé.

Quatorze (14) compositions de béton ont été testées en utilisant des techniques standards (au tamis et à la colonne) ainsi que la vitesse d'impulsion ultrasonique proposée ici. Des corrélations ont été effectuées en fonction de différents indices de ségrégation afin de vérifier si la méthode VIU et reflète bien l'état de ségrégation. Six (6) des quatorze (14) mélanges de béton étaient stables, en se référant aux indices de stabilité " π " et de résistance " f ", Ces six (6) compositions stables ont montré des valeurs de l'indice de ségrégation ultrasonique proches de 100%. On a constaté que les compositions de béton restantes étaient instables avec des valeurs de l'indice de ségrégation au tamis supérieures à 15%, les valeurs de l'indice de résistance " f " sont inférieures à 65%, et des indices de ségrégation ultrasonique " f_u " inférieurs à 80%. La méthode par vitesse d'impulsion ultrasonore pourrait être une alternative rapide et facile pour caractériser la ségrégation du béton frais et durci.

Mots clés : Béton fluide, ségrégation, stabilité, vitesse d'impulsion ultrasonique, corrélations.

تعززت أسرة الخرسانة، بشكل ملفت، في السنوات الأخيرة بخرسانات ذات مميزات جديدة، مثل الخرسانة ذاتية الدمك («BAP» (bétons auto-plaçant) وآخرون ...

يتفق معظم المؤلفين على ضرورة استعمال، على الأقل، اختبارين تجريبيين مختلفين لإقامة علاقات بين القيم الخصوصية والخصائص الريولوجية للخرسانة بغية الوصول إلى معرفة سلوكها أثناء الصب والتدفق بشكل موثوق به.

الفصل هو واحد من هذه الخصائص الريولوجية، ويتجلى ذلك بالفصل اللاإرادي للمكونات الطازجة للخرسانة أو الملاط، هذا الأخير يمكن أن يكون له تأثيرات سلبية على، الخواص الميكانيكية، النقل وديمومة الخرسانة المتصلبة. يدرس هذا العمل إمكانية استخدام تقنية غير مدمرة "سرعة النبض فوق الصوتي (UPV)" لتشخيص الفصل في الخرسانة السائلة والخرسانة ذاتية الدمك (BAP)، المعروف عنها أنها معرضة بشكل خاص للفصل بسبب سيولتها العالية، وذلك على غرار الاختبارات التجريبية الأكثر استخداماً (اختبار الانتشار، اختبار علبة "L"، اختبار الغربال، اختبار العمود).

أربعة عشر (14) عينة خرسانية مختلفة تم التجارب عليها باستخدام تقنيات القياس التقليدية (تجارب الغربال وتجارب العمود) وبطريقة سرعة النبض فوق الصوتية (UPV) المقترحة هنا. مقارنات أجريت وفقاً لمؤشرات الفصل المختلفة للتحقق ما إذا كانت طريقة UPV تعكس بصفة جيدة حالة الفصل. ستة (6) من أربعة عشر (14) خلطة خرسانية التي استعملت في هذا العمل وجدت، مستقرة حسب ما تبينه المؤشرات؛ مؤشر الغربال، مؤشر مقاومة الفصل. هذه العينات الستة (6) المستقرة، أظهرت قيم مؤشر الموجات فوق الصوتية قريبة من 100 %.

لاحظنا بالنسبة للعينات المتبقية فهي غير مستقرة، بقيم مؤشر فصل الغربال (π) أكبر من 15 %، قيم مؤشر المقاومة (f) أقل من 65 %، وقيم مؤشر الموجات فوق الصوتية " f_u " أقل من 80 %.

طريقة سرعة النبض فوق الصوتي يمكن أن تكون بديلاً سريعاً وسهلاً لتشخيص الفصل في الخرسانة الطازجة والمتصلبة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة السائلة، الفصل، الاستقرار، سرعة النبض فوق الصوتية، المقارنات.

The concrete family has been growing steadily for several years with new performances, such as self-consolidating concrete (SCC), and others. The majority of authors agree on the need for less than two empirical tests to establish relationships between specific and rheological quantities of concretes. The appearance of these factors is explained by the behavior of the concrete during the flow.

Segregation is the involuntary separation of fresh components from concrete or mortar, which can have negative impacts on the mechanical properties, transportation and durability of the cured product. To address this deficiency, this work investigates the potential for using ultrasonic pulse velocity (UPV) as a means of identifying and characterizing segregation in fluid concrete and self-consolidating concrete (SCC), the latter known to be particularly prone to segregation because of its high fluidity.

14 different concrete samples were tested using standard (sieve and column) techniques compared to the ultrasonic pulse velocity method proposed here. Correlations were performed according to different segregation indices to verify whether the UPV method is efficient and reliable compared to traditional methods. Six of the 14 concrete mixes were stable, as indicated by indices, sieve segregation and segregation resistance. These 6 stable samples showed values of the ultrasonic segregation index close to 100%. The remaining samples were found to be unstable concretes with sieve segregation index values greater than 15%, resistance index values " f " are less than 65%, and an index of ultrasonic segregation " f_u " less than 80%. The ultrasonic pulse velocity method could be a quick and easy alternative to testing the segregation of fresh and cured concrete.

Keywords: Fluid Concrete, Segregation, Stability, Ultrasonic pulse velocity, Correlations.

Introduction

La ségrégation est la séparation des composants d'un béton frais ou mortier. Quand la ségrégation se manifeste dans le béton, les gros grains se retrouvent souvent concentrés dans certaines sections et les grains fins dans d'autres. La ségrégation crée un mélange non uniforme qui ne correspond plus à la formulation du mélange initiale (granulométrie du contenu global) et par conséquent une mauvaise performance structurelle [Panesar et Shindman, 2012], et donc une courte espérance de vie et coûts d'entretien plus élevé.

La ségrégation peut se produire en raison de la composition du béton ou sa manipulation. Par exemple, la quantité d'eau et sa qualité sont sues pour influencer la séparation entre mortier et graviers [Li et al. 2013]. Pour éviter le risque de ségrégation et sa répercussion sur la résistance du béton à long terme, les mélanges eau-réducteurs sont souvent utilisés pour minimiser la quantité d'eau exigée pour produire du béton d'une certaine qualité. Malheureusement, ces mélanges (plastifiants, fluidifiants, parmi autres) peuvent causer un ressuage excessif ou conduisent aussi parfois à la ségrégation [Uysal et al. 2012]. Ce problème se manifeste dans les bétons ordinaires et ceux à haute performance [Ghafoori, et Diawara, 2010 ; Job et Harilal, 2014], tel que ceux qui contiennent des additions calcaires, même dans l'absence des signes externes, de l'eau ou des auréole de laitance [Khayat et Guizani, 1997 ; Bauchkar Sunil et Tâche 2014 ; Vakhshouri et Nejadi, 2016], mais présente un risque non négligeable pour les bétons auto-plaçants (BAP).

Le BAP a connu une réputation mondiale depuis sa première introduction dans les dernières décennies [Okamura et Ouchi, 2003]. Le BAP est caractérisé par sa capacité de mis en place sous son propre poids et sans vibration. L'idée est que, cet auto-compactage, a une influence fondamentale sur la capacité de couverture des barres de ferrailage et réduit le risque de ségrégation. Donc, le BAP peut améliorer considérablement la performance à long terme du béton sur site (comme il a été discuté largement par [Xie et al. 2002]. Avec le BAP le risque de la ségrégation provient généralement de sa haute fluidité ; typiquement le mélange d'un BAP a une quantité d'eau relativement faible (E/C rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La ségrégation se produit typiquement pendant la mise en place [Khayat et Feys, 2010], et l'hétérogénéité résultant peuvent compromettre la résistance et la durabilité dans ces régions.

Les essais de la ségrégation sont exécutées habituellement sur des échantillons de béton durci ou en cours de durcissement [Okamura et Ouchi,

2003 ; Shindoh et Matsuoka, 2003 ; Le Rakesh et al, 2015]. Ces essais sont de types destructifs, qui se fondent généralement sur des techniques de comptage du pourcentage des gros granulats. L'essai de stabilité au tamis mesure la portion de l'échantillon du béton frais qui traverse un tamis de 5mm. Si le béton a une résistance pauvre à la ségrégation, il peut traverser facilement le tamis, par conséquent, la portion tamisée indique si le béton est stable ou pas, [De Schutter et al. 2005]. Un autre essai utilisé est « l'essai de Cylindre » dans lequel la différence entre les pourcentages en poids de gros granulats, dans les sections du fond et du sommet, sont considérées [Ambroise et al. 1999, Rols et al. 1999].

Dans l'essai à la Colonne (lequel est aussi destructive) implique l'analyse d'échantillons du sommet et de la partie inférieure de la colonne, détermine la proportion du total des gros granulats [Cussigh et al, 2003], Cet appareil qui a été employé depuis longtemps [Sidky et al, 1981] et récemment, il a été évalué au niveau européen et il à été considéré comme suffisamment adaptable aux variations de conception des BAP [Cussigh et al, 2003].

Finalement parmi les essais destructives prédominantes est l'essai à la bille qui, dans un cylindre de dimensions pré-spécifiées, il permis de mesurer l'enfoncement d'une bille de même dimension que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton frais. La profondeur de la pénétration indique le niveau de la stabilité du BAP [De Schutter et al. 2005].

Il y a aussi des essais non-destructives dites « non-destructives testing (NDT) » abordés par [Kumavat et al. 2014 ; Mesbah et al. 2011 ; Silva et Brito, 2013]. Par exemple, [Breul et al. 2008] utilisent l'analyse d'image pour caractériser la ségrégation du béton sur site. Comme partie de ce travail effectuer sur le BAP à granulats recyclé, a été conduit sur colonnes de diamètre 16 centimètres. Le gamma densimètre a été aussi utilisé pour évaluer la ségrégation dans le béton [Schwhdenmann et al. 2005 ; Li et al. 2011 et Tribikram, 2014].

Par conséquent, beaucoup de méthodes (NDT) trouvent leurs applications dans l'industrie de la construction. La recherche intense dans ce champ a mené à validé des matériels NDT très sophistiqués qui rendent la collection du données plus rapide et plus facile. Par l'analyse adéquate des résultats issus de ces techniques NDT, c'est possible de prédire les importants paramètres du béton des structures, plutôt que de se limiter à détecter la qualité [Sanish et Manu, 2012].

La méthode des vitesses des pulsations ultrasoniques (VIU) est la plus largement utilisée des NDT pour l'inspection et l'évaluation de structures en béton que ce soit dans les sites et dans le laboratoire. L'VIU est principalement utilisé pour la détermination du module dynamique d'élasticité et du coefficient de Poisson [Huet, 1982]. On utilisant l'VIU, [Naik et Malhotra, 1991] et Malhotra et [Carino, 1991] ont démontré que la relation entre la résistance à la compression et la vitesse de pulsation ultrasonique était non-linéaire. Ils ont conclu que plusieurs paramètres peuvent influencés cette relation y compris la composition du béton et son taux d'humidité. Cependant ils existent des normes qui proposent, pour dépasser ces difficultés, des corrélations tel que [RILEM, 1973 ; ASTM, 2009 ; British, 2004]. L'hétérogénéité du béton crée des dispersions des pulsations [Guoxuan et al. 2011]. Ces dispersions sont causées par des facteurs indirects tel que l'origine du mélange du béton et les problèmes de la mise en place 'in-situ' (par exemple l'excès de vibration, la hauteur de chute). Plusieurs travaux appliquent l'VIU au béton, ne sont pas complets mais montrent ses potentialités telle que le travail de Benouis et Grini [Benouis et Grini, 2011] sur l'estimation de la porosité des bétons ou celui de Kumavat et al. [Kumavat et al. 2014] sur l'évaluation du béton dans les conditions générales.

Ces travaux indiquent que l'VIU devrait être une prometteuse technologie pour étudier la ségrégation du béton, parce que l'hétérogénéité du béton crée des dispersions de pulsations [Silva et Brito, 2013 ; Tribikram, 2014], et ces dispersions sont causées par les facteurs indirects tel que l'origine des granulats, les constituants du mélange et les problèmes de consolidation (vibration) pendant la mise en place du béton. Donc, comme a été noté par [Hamidian et al. 2012], l'VIU peut être appliqué au béton, à l'état frais ou au début de prise, pour établir des corrélations entre ces vitesses, l'indice de la ségrégation au tamis π , et l'indice de la résistance à la colonne f . Cela est basé sur le fait que la variation de la densité du béton à travers la hauteur d'un élément peut être déterminée par VIU et que le mortier et les granulats transmettent la vitesse des ultrasons distinctivement. Ces différences peuvent, par conséquent, être utilisées pour évaluer la quantité de granulats à travers la hauteur des éléments. Donc, l'objectif de cette étude expérimentale est d'analyser les corrélations entre les indices de la ségrégation et la vitesse de pulsation ultrasonique. Dans le but de proposer une alternative, rapide et non-destructive, de caractérisation de la ségrégation de bétons.

Organisation du mémoire

L'objectif de ce mémoire étant de caractériser la ségrégation du béton par une technique non destructive, notre étude expérimentale s'articule principalement sur des essais comparatifs de ségrégation par des essais classiques (au tamis et à la colonne) et des essais de mesure des vitesses des ultrasons sur les mêmes éprouvettes.

Le mémoire décrit les démarches scientifiques adoptées, les résultats obtenus et l'analyse qui en a été faite.

Le premier chapitre est consacré aux propriétés des bétons frais, en commençant par la description du mécanisme de l'hydratation du ciment et les conséquences physiques de l'hydratation sur la création d'un milieu poreux. La cohésion et la rigidité de la matrice solide sont procurées par l'augmentation des produits d'hydratation. Ensuite ce chapitre s'intéresse au phénomène de ségrégation qui se manifeste par la séparation des phases du béton et les essais traditionnels de sa caractérisation.

Le deuxième chapitre qui porte sur les notions d'excitation et de propagation des ondes ultrasonores et leurs applications dans la détermination de quelques propriétés des bétons ainsi que sur les caractéristiques et causes d'atténuation des signaux ultrasoniques et en fin l'application de la technique des ultrasons au cas du béton avec sa sensibilité des ondes ultrasoniques à la granulométrie et la composition des bétons,.

Cette synthèse bibliographique a permis de construire notre méthodologie expérimentale.

L'étude expérimentale est abordée à partir du troisième chapitre, par l'exposition de la méthodologie expérimentale adoptée et la caractérisation des différents matériaux utilisés. Ainsi quatorze (14) compositions de bétons sont proposées pour les essais avec des variations des rapports E/L et F/L , le rapport (S_p/L) étant maintenue proche à la saturation. La méthodologie expérimentale suivie s'articule principalement sur des mesures des indices de ségrégation (indice de stabilité au tamis et indice de résistance à la colonne) et des mesures des vitesses des ultrasons (donnant des indices de ségrégation ultrasoniques).

Enfin, Quatrième chapitre aborde l'interprétation et l'exploitation des résultats expérimentaux réalisés.

Divers relations ont été étudiées, elles ont concernés l'évolution des vitesses en fonction de divers paramètres tels que, le rapport (E/L) et le rapport (F/L), et les corrélations entre les vitesses des ultrasons (indices ultrasonores) et les autres indices de ségrégation.

Le mémoire est terminé par une conclusion générale ainsi que des perspectives futures à ce travail.

I.1- Introduction

Le béton est un matériau évolutif, dont la maturation progressive se caractérise par le passage d'un état presque liquide à un matériau viscoélastique en l'espace de quelques heures, suivi d'une évolution ultérieure vers un matériau durci présentant des résistances mécaniques importantes.

Parmi les différents types de bétons, le Béton à Haute Performance (BHP), dont utilisation intensive (au cours des dernières années) a été motivée par les résistances élevées, la bonne ouvrabilité, et la bonne durabilité obtenues. Toutefois, les recherches effectuées sur le BHP ont montré que le faible rapport E/C employé mène à une réduction plus prononcée du volume du béton, et à une plus grande sensibilité à la fissuration. Ceci n'est pas seulement une conséquence de la chaleur d'hydratation, mais également la conséquence du retrait endogène et du retrait d'auto-dessiccation qui se produisent au jeune âge.

Le béton comme tous les matériaux cimentaires subit des variations de volume significatives, qui se manifestent dès les premières heures qui suivent sa fabrication, et qui sont provoquées en grande partie par l'hydratation du ciment [Byfors, 1980].

En pratique, il arrive que ces changements volumiques soient si importants qu'ils mènent à la fissuration de l'ouvrage. Au cours des dernières années, de nombreuses études ont ainsi démontré que les problèmes de fissuration du béton au jeune âge peuvent être directement liés aux déformations endogènes de la pâte de ciment [Igarashi et al. 2000] ; [Lachemi et al. 2001], [Ulm et al. 2001], qui sont produites dès les premières heures de la réaction d'hydratation. Toutefois, la connaissance incomplète des propriétés du béton au jeune âge limite la possibilité d'étudier les structures en béton et complique les prévisions de fissuration dans les jours qui suivent la mise en place du béton.

La caractérisation du comportement des matériaux cimentaires à l'état frais n'est en effet pas simple. Ceci qui est d'autant plus vrai lorsque la composition fait intervenir un super-plastifiant associé à un agent viscosant. Cependant les études numériques ou expérimentales dans des fluides modèles fournissent des pistes pour la compréhension des mécanismes de ségrégation statique [Tangtermsirikul et al. 2000] et [Hu, 1995]. Le comportement d'un granulat sera alors assimilé à celui d'une sphère.

Ce chapitre traite donc ; **en premier lieu**, de la description du processus d'hydratation des constituants principaux du ciment. Pour suivre l'évolution du béton au jeune âge, le degré d'hydratation apparaît comme le paramètre fondamental qui caractérise l'état de la pâte, et les différentes définitions de ce paramètre sont passées en revue avant de

s'intéresser aux techniques expérimentales existantes pour sa détermination. L'étude des processus d'hydratation conduit naturellement à s'intéresser à la cinétique d'hydratation, et on définit ensuite la notion de maturité.

En 2^{ème} lieu, de la corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques de la fluidité ainsi que les mécanismes générant cette fluidité et en 3^{ème} lieu, les essais de caractérisation de la ségrégation qui, s'agit de trouver un compromis entre deux caractéristiques qui peuvent sembler contradictoires : fluidité et stabilité.

1.2- Description du mécanisme de l'hydratation du ciment.

Le béton est un mélange de plusieurs composants, les agrégats, le sable, le ciment et l'eau. Parmi ces derniers, le composant le plus important est le ciment, dont la propriété essentielle est de durcir au contact de l'eau. C'est pour cette raison qu'on l'appelle le liant hydrique du béton. [Taylor, 1990] a défini de manière générale l'hydratation du ciment par " L'ensemble des changements qui se produisent quand un ciment anhydre, ou une de ses phases constitutives, est mélangé avec de l'eau". Dès que le ciment anhydre est mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés du béton ainsi obtenu évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée le béton reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée.

Les composants du ciment sont les suivants :

1. le clinker
2. le sulfate de calcium
3. les ajouts éventuels (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers et les fumées de silice)

Le clinker est obtenu par un broyage à haute température (1450°C) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire. Les composés minéralogiques principaux du clinker sont :

1. Les silicates.
 - Tricalcique (*Alite*) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S).
 - Bi-calcique (*Belite*): $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S).
2. Les aluminates
 - Tricalcique : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A).
 - Ferro-aluminate tétra-calcique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Les termes C_3 , C_2 ..., se rapportent aux abréviations suivantes, utilisées en chimie du ciment

- $\text{C} = \text{CaO}$: la Chaux,
- $\text{S} = \text{SiO}_2$: la Silice,
- $\bar{\text{S}} = \text{SO}_3$: le trioxyde de soufre,
- $\bar{\text{C}} = \text{CO}_2$: le dioxyde de carbone,

H = H₂O : l'eau,
 F = Fe₂O₃ : la Ferrite.

Le mélange de ciment et d'eau forme une pâte qui se rigidifie progressivement et devient solide après un délai de quelques heures : c'est le phénomène de prise du ciment. La prise du ciment est le résultat de réactions entre l'eau et les constituants du ciment anhydre.

Le principal produit de l'hydratation est le silicate de calcium hydraté $CaO.SiO_2.H_2O$ ou *C-S-H*, Figure (I.1), [Mitani, 2003], l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ (CH) appelé portlandite, et les aluminates hydroxyde de calcium sous forme d'étringite *AFt* (trisulfo-aluminate), Figure (I.2), [Mitani, 2003] et mono sulfo-aluminates *AFm*.

Le sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Il peut se présenter sous forme de gypse (CaSO₄.2H₂O), d'hémihydrate (CaSO₄.1/2 H₂O) ou de mélange des deux. Le gypse est souvent associé à de l'anhydrite (CaSO₄).

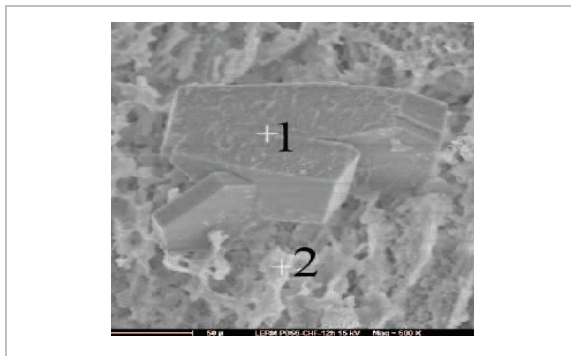


Figure I.1 - Image obtenue au MEB de Portlandite dans la matrice, Échantillon CEM III/B 12h, 1 = Portlandite, 2 = C-S-H.

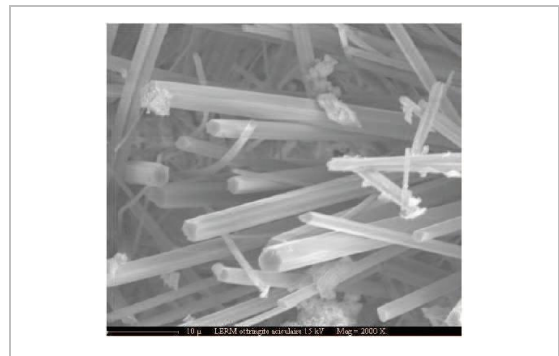
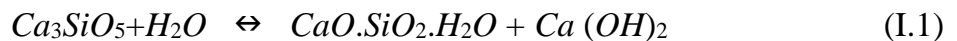


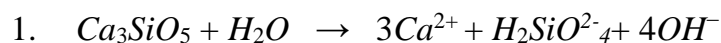
Figure I.2- Image obtenue au MEB, MEB de Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.

I.2.1- Hydratation du C₃S.

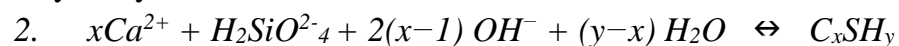
Le constituant majoritaire du ciment anhydre est le silicate tricalcique C₃S. L'hydratation du C₃S produit un silicate de calcium hydraté, C-S-H, et de la Portlandite Ca(OH)₂ (C-H). L'équation globale de l'hydratation du C₃S est la suivante [Le Chatelier, 1904] :



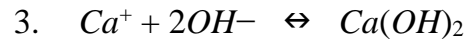
Dans cette écriture la stœchiométrie du C-S-H n'est pas précisée. L'hydratation du C₃S procède selon trois réactions qui deviennent successivement simultanées [Barret et Bertrandie, 1986] :



Cette première étape consiste en la dissolution congruente des grains de Ca₃S superficiellement hydroxylés.



Les ions silicates ayant atteint la limite de leur sursaturation, précipitent tandis que la dissolution des grains de Ca_3S se poursuit.



La troisième réaction du système est la précipitation des ions calcium sous forme de Portlandite, Figure (I.1). La stœchiométrie du $C-S-H$ dépend des concentrations en ions calcium et silicate dans la solution d'hydratation. Le paramètre le plus courant pour caractériser la stœchiométrie du $C-S-H$ est le rapport entre le nombre d'atomes de calcium et le nombre d'atomes de silicium dans la structure : le rapport C/S . Ce rapport varie, dans les $C-S-H$, entre $C/S = 0,7$ et 2 , [Klur, 1996]. La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie par des mesures de calorimétrie et de conductivité, qui sont décrites plus bas. L'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes, que [Barcelo, 2001] décrit de la manière suivante :

Période 1 : Réactions initiales.

Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions SiO_4^- qui sont situés en surface des grains passent en solution. La présence de ces ions provoque une augmentation de la conductivité électrique du milieu. Une couche protectrice de $C-S-H$ se forme alors autour des grains et empêche la réaction entre les silicates et l'eau. Par conséquent la dissolution du C_3S devient très lente après quelques minutes, et la première période se termine rapidement.

Période 2 : Période d'induction ou période dormante.

Durant cette période il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur. Ainsi la concentration en calcium croît alors que la concentration en silice décroît. La conductivité augmente mais plus faiblement que lors de la première période. Les $C-S-H$ dits métastables ($C-S-H(m)$) continuent de se former autour des grains de C_3S alors que la Portlandite ne précipite pas. Cette période est dite dormante car le degré d'hydratation ξ reste faible et quasiment constant.

– **Période 3** : Période d'accélération.

La caractéristique de cette période est le fort dégagement de chaleur qui traduit une activité chimique intense. C'est pendant cette période que survient la prise, deux types de réactions mènent à la formation de ($C-S-H$) dits ($C-S-H(s)$) et de Portlandite. La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle. Cette période s'accompagne également d'une baisse importante de la conductivité, Figure (I.3), [Vernet et Cadoret, 1991].

– **Période 4** : Période de décélération.

La formation de la couche d'hydrates ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion à travers la couche d'hydrates déjà formés. En conséquence, la cinétique d'hydratation ralentit avec le temps. A mesure que les hydrates se forment, les ions

disparaissent de la solution interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité électrique. Il apparaît également une diminution de la chaleur dégagée pendant cette période.

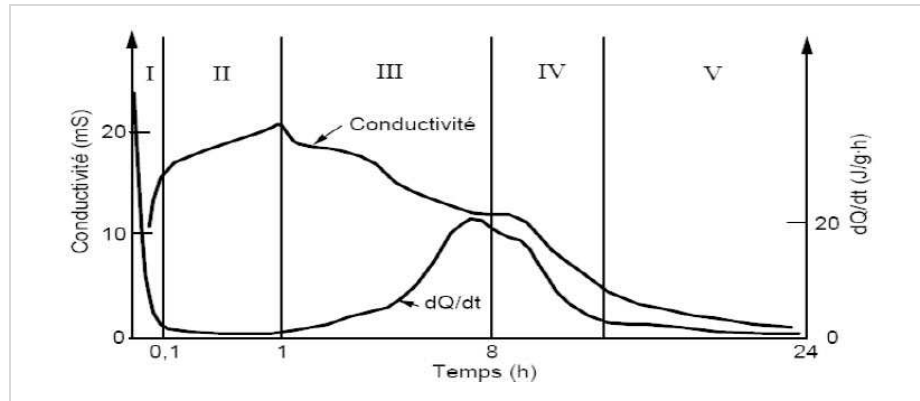


Figure I.3 - Evolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C3S.

– **Période 5** : Période de consolidation.

Cette dernière période est considérée comme quasi-stable. Le ralentissement de la réaction, du au caractère diffusif de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années. Cette période est très importante du point de vue du développement de la résistance mécanique, car elle commence très tôt, après un jour d'hydratation, et persiste longtemps après. D'après la description qui vient d'être donnée de l'hydratation des silicates, il apparaît que l'évolution de la chaleur d'hydratation passe par un premier maximum, diminue à un minimum pendant la période d'induction, passe ensuite par une deuxième maximum et diminue finalement de façon progressive [Taylor, 1990], Figure (I.4), [Brown *et al.* 1986].

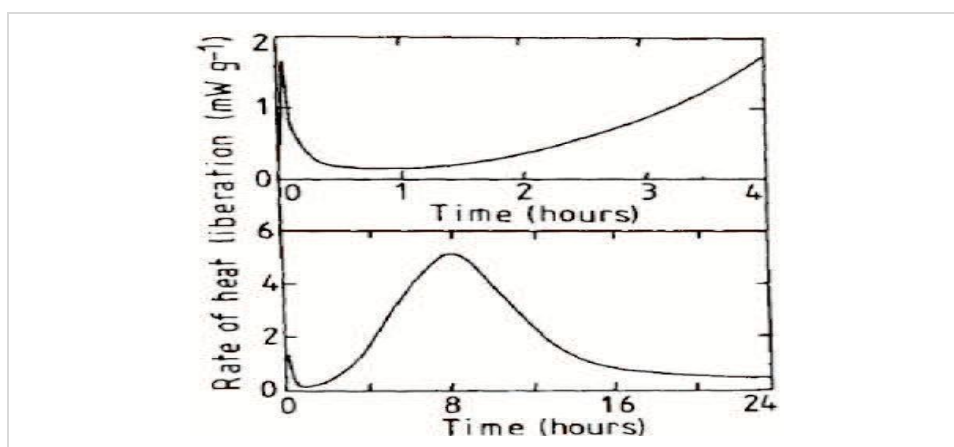


Figure I.4- Courbe calorimétrique typique reliant le taux de libération de la chaleur d'hydratation du C₃S avec le temps.

I.2.2- Hydratation des aluminates

L'hydratation des aluminates étant très rapide, les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [Taylor, 1990]. L'Aluminate Tricalcique C_3A est responsable du phénomène de "prise éclair" qui conduit à la formation d'aluminates hydratés. Les hydrates issus de l'Aluminate Ferro aluminate, C_4AF , se déduisent de ceux du C_3A par substitution de l'alumine Al_2O_3 par l'alumino-ferrite ($Al_2O_3.Fe_2O_3$) dans les formules chimiques. Pour cette raison, nous présentons seulement l'hydratation du C_3A .

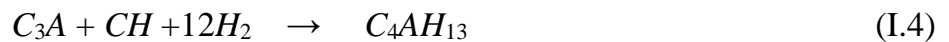
En l'absence de sulfates, le C_3A est très réactif lorsqu'il entre en contact avec l'eau.

En revanche son hydratation est régulée en présence de gypse, et conduit à la formation de tri-sulfo-aluminate de calcium hydraté (**T-S-A**) ou étringite.

L'étringite n'est un produit hydraté stable que lorsque la quantité de gypse est suffisante.

Dans la majorité de cas, le C_3A est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le C_3A n'est pas complètement hydraté, l'étringite se transforme en monosulfo-aluminate tétra-calcique (MSA). De plus, s'il reste du C_3A après la formation du monosulfo-aluminate tétra-calcique, il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate du type $C_3A, 1-xCH, H_{19}$.

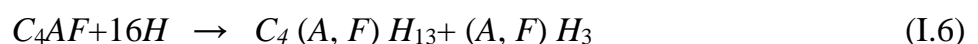
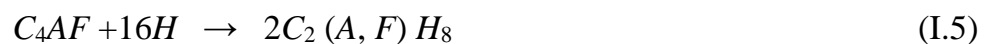
Les réactions sont résumées par les équations suivantes [Taylor, 1990] :



Le C_3A et le gypse se dissolvent les premiers lors de l'hydratation du ciment. Le C_3A est ensuite recouvert d'une couche protectrice d'étringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recristalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques. C'est pourquoi la présence d'étringite fragilise le matériau [Regourd, 1982b]. L'étringite et les monosulfates représentent environ (20–30%) du ciment hydraté. La vitesse de recristallisation de l'étringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de conserver la maniabilité de la pâte dans les premières heures.

La phase ferritique C_4AF constitue environ (8–13%) d'un ciment Portland. Cette phase est en réalité une solution solide dont la composition répond à la formule $C_2 (Ax, F^{1-x})$ pour x compris entre 0 et 0.7 [Ramachandran, 1995].

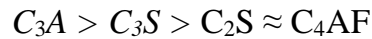
De nombreuses études ont montré que l'hydratation des phases C_4AF se rapproche de celle du C_3A lors que les conditions d'hydratation sont identiques [Taylor, 1990]. En présence d'eau, le C_4AF réagit de la manière suivante avec $(A, F) = (A_x, F^{1-x})$:



En présence de gypse l'hydratation du C_4AF est plus efficacement retardée que celle du C_3A [Fukuhara *et al.* 1981].

I.2.3- Prise du ciment

La réaction d'hydratation du ciment Portland va combiner les réactions d'hydratation des principaux constituants du clinker. D'une manière générale, la réactivité avec l'eau des différentes phases minérales d'un ciment respecte l'ordre suivant :



Au cours de l'hydratation du ciment, la pâte se rigidifie puis durcit. Cependant la prise du ciment n'est pas uniquement liée à la quantité d'hydrates formée. La structuration et la prise peuvent être caractérisées par deux processus fondamentaux : la coagulation et la rigidification [Jiang *et al.* 1995]. La coagulation correspond à la formation de contacts entre particules par interactions réversibles. La forte augmentation de la force ionique de la solution au cours de l'hydratation est à l'origine d'une diminution de la portée de la répulsion électrostatique due à une diminution de la longueur de Debye entre les grains partiellement hydratés. [Nonat et Mutin, 1992] ; [Nachbaur *et al.* 2001]. La réversibilité de ce phénomène permet à la pâte de conserver sa maniabilité pendant la période dormante.

1.2.4- Définition du réseau poreux

La structure des matériaux cimentaires est un milieu poreux saturé ou partiellement saturé d'eau dans lequel on retrouve une matrice solide, une phase liquide, une phase gazeuse et, le cas échéant, des espaces vides. Les pores, qu'ils soient vides ou saturés, peuvent être interconnectés ou isolés. La porosité représente l'ensemble de ce volume total de vide, Figure I.5.

Les bulles d'air qui apparaissent dans le matériau lors du malaxage ne sont pas considérées dans cette étude. La présence de ce volume de vide est négligée, comme dans la plupart des approches, [Hua 1995] ; [Bissonnette *et al.* 2000].

1.2.5- Evolution de la porosité

Le réseau poreux de la pâte de ciment hydraté est déterminé par l'agencement des divers produits d'hydratation. Différentes tailles de pores existent dans un béton : vides d'air entraînés lors du malaxage, pores capillaires dus à l'eau de gâchage, micropores apparaissant au fur et à mesure de l'évolution de la réaction d'hydratation (Tableau I.1). Le réseau poreux d'un béton peut être caractérisé par deux grandes familles de pores : la porosité intrinsèque des hydrates (nanomètre) et la porosité capillaire (espaces résiduels entre les grains de ciment non comblés par les hydrates).

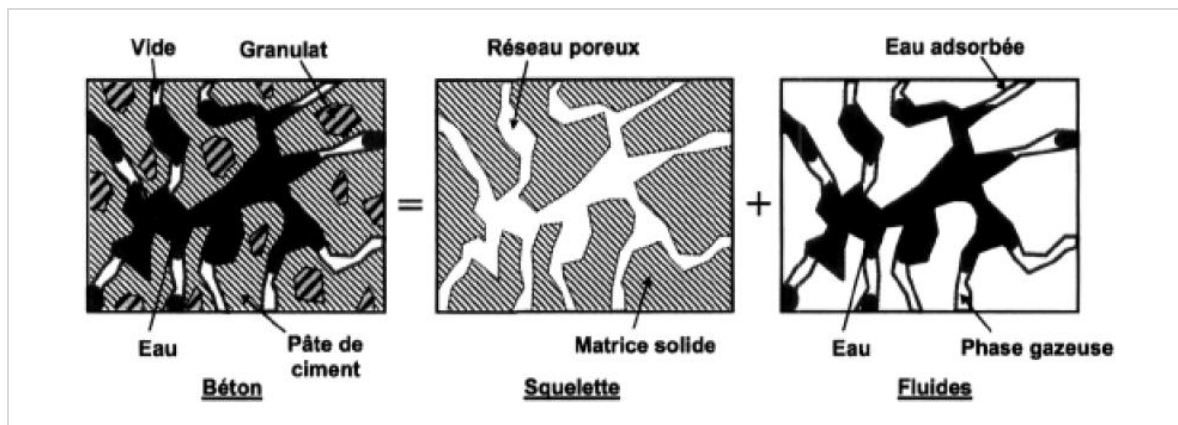


Figure I.5 - Représentation du caractère hétérogène d'un béton par la somme d'un squelette (Matrice solide + réseau poreux) et de fluides saturant l'espace poreux.

Le volume des pores de gel (porosité des hydrates) augmente avec l'hydratation alors que les pores capillaires, représentant le volume poreux non rempli par les produits d'hydratation, diminue à mesure que progresse l'hydratation [Neville 2000].

Comme le montre la Figure I.6, la porosité totale d'un matériau cimentaire, déterminée expérimentalement par intrusion au mercure, diminue progressivement au fur et à mesure de l'avancée de la réaction d'hydratation [Roy et al. 1993].

Tableau I.1 - Classification des pores dans la pâte de ciment hydraté (Young et coll. 1986 cité dans [Bissonnette 1996]).

Désignation	Diamètre	Particularités
micropores	< 2,5 nm	partie intégrante des CSH
Méso-pores	2,5 - 50 nm	pores capillaires
Macro-pores	50nm - 10 μ m	
vides d'air entraîné	10 μ m- 0,1 mm	non reliés directement aux mécanismes de retrait et de fluage
vides d'air occlus		
microfissures préexistantes		

En cours d'hydratation, après la prise du matériau ($t > t_0$) et pour un milieu réactif fermé (sans échange d'humidité avec l'extérieur), le volume poreux total (V_p) d'un béton correspond à la somme du volume d'eau évaporable (V_e) et du volume de vide (V_v). Ainsi :

$$V_p(t) = V_e(t) + V_v(t) \quad (I.7)$$

La porosité lagrangienne (p) se caractérise par la relation suivante :

$$(p)(t) = V_p(t)/V_t(t_0) \quad (I.8)$$

Le volume d'eau évaporable $V_e(t)$ diminue en fonction de la quantité d'eau consommée pour former les hydrates comme le montre la relation suivante où ρ représente la masse volumique de l'eau :

$$V_e(t) = [m_e(t=0) - m_{eI}(t)] / \rho \quad (I.9)$$

La diminution expérimentale de la porosité totale peut être retrouvée théoriquement par les deux expressions précédentes. En effet, en fonction de l'hydratation et des travaux de [Bresson 2005], le volume d'eau liée (0.23 g/g de ciment hydraté) est supérieur au volume de vide créé par la contraction des hydrates. De même, la distribution poreuse (volume poreux en fonction du rayon de pore) évolue avec l'hydratation. La Figure I.6, montre clairement que plus l'hydratation, avance plus la distribution poreuse tend vers des pores de petites tailles.

Pour un milieu fermé, si au départ (prise du matériau) les pores sont saturés d'eau, le degré de saturation en eau S_i va diminuer avec l'hydratation puisqu'un volume de vide va apparaître progressivement dans le réseau :

$$S_i(t) = V_e(t) / V_p(t) \quad (I.10)$$

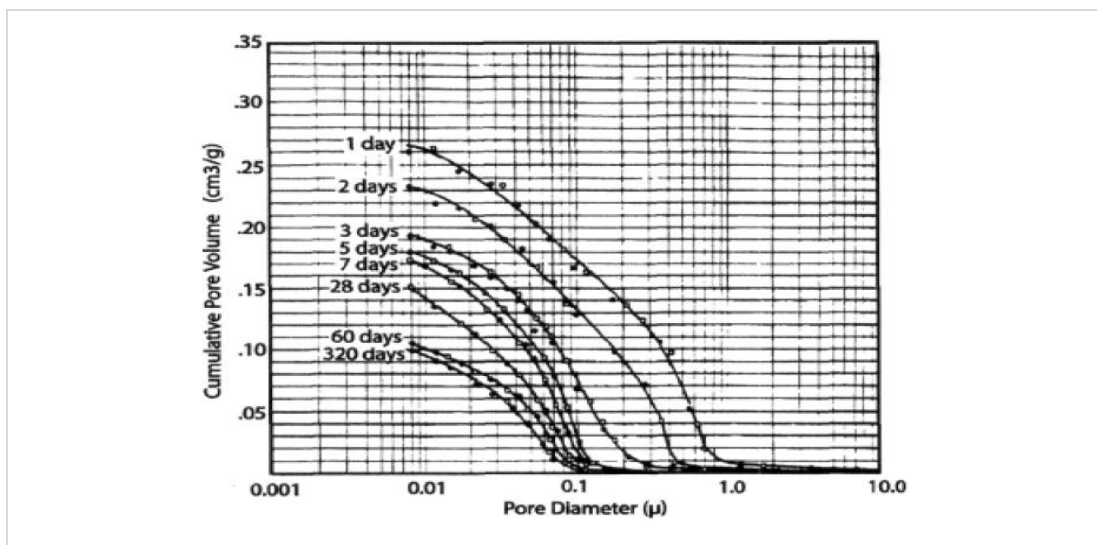


Figure I.6- Evolution expérimentale en fonction du temps de la distribution poreuse d'une pâte de ciment ($E/C = 0.4$), maintenue à 24 °C, par intrusion au, tiré de [Brown et al. 1993] dans [Roy et al. 1993].

Cette diminution du degré de saturation apparaît en premier lieu dans les pores de grandes tailles, comme pour le séchage, soit les capillaires [Baron et al. 1982].

Les pores capillaires jouent un rôle important sur les propriétés mécaniques, sur les propriétés de transport et sur la stabilité volumique (retrait et fluage). Les pores capillaires contrôlent, par exemple, la perméabilité des pâtes de ciment. L'hydratation entraîne une augmentation du volume de la matrice solide. Au fur et à mesure de l'avancement de la réaction d'hydratation, la quantité de grains anhydres et la porosité capillaire diminuent (remplissage progressif des capillaires par les hydrates). A l'inverse, la fraction volumique d'hydrates et la nano-porosité (eau emprisonnée par les hydrates lors de leur formation), par conséquent, augmentent.

I.2.6- Conclusion.

L'hydratation entre le ciment et l'eau, qui est caractérisée par une réaction complexe mettant en jeu plusieurs mécanismes, peut être modélisée à l'échelle macroscopique par un degré d'hydratation global. Pour les bétons, cette hydratation est à l'origine de l'évolution d'une microstructure hétérogène vue comme un milieu poreux évolutif composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux. Une approche simplifiée de l'évolution de la microstructure basée sur l'équation de conservation de masse permet de connaître les évolutions volumiques de chaque composant du milieu poreux en fonction de l'avancement de la réaction d'hydratation.

Le volume poreux, qui au départ correspond à la quantité d'eau libre présente au malaxage, va diminuer au fur et à mesure que l'hydratation progresse. Pour un milieu fermé (sans échange hydrique avec l'extérieur du matériau), un volume de vide, provoqué par la contraction des hydrates, apparaît dans ce réseau poreux engendrant une diminution de la saturation en eau et par conséquent de l'humidité relative. L'augmentation de ce volume de vide dans la porosité entraîne également une diminution de l'épaisseur de l'eau adsorbée à la surface des pores.

L'évolution de l'hydratation se traduit à l'échelle macroscopique par une évolution des propriétés mécaniques et des déformations endogènes.

I.3- Fluidité et ségrégation des bétons.

I.3.1- Aspects théoriques

La caractérisation du comportement des matériaux cimentaires à l'état frais n'est en effet pas simple. Ceci qui est d'autant plus vrai lorsque la composition fait intervenir un super-plastifiant associé à un agent viscosant. Cependant les études numériques ou expérimentales dans des fluides modèles fournissent des pistes pour la compréhension des mécanismes de ségrégation statique [Tangtermsirikul et al. 2000] et [Hu, 1995]. Le comportement d'un granulat sera alors assimilé à celui d'une sphère.

I.3.1.1- Mouvement des particules dans les fluides

Dans la littérature résultent de simulations numériques de chute de sphère(s) dans des fluides, une particule sphérique rigide immergée dans un fluide est soumise à différentes forces : la force de gravité, la poussée d'Archimède et la force de traînée Figure I.7.

Avec, $F_g = mg$.

$F_A = m g$

$m = \text{masse du granulat,}$

g = accélération de la pesanteur,
 m : masse de liquide déplacée par la particule.

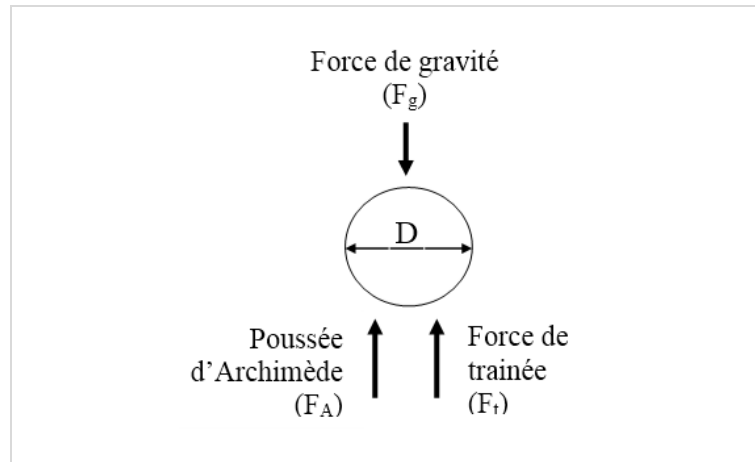


Figure I.7- Particule sphérique rigide immergée dans un fluide est soumise à différentes forces

La force de traînée dépend quant à elle des caractéristiques du milieu et doit être définie :

$$F_t = F_g + mg. \quad (\text{I.11})$$

$$F_t = \rho_s V_p g - \rho_f V_p g \quad (\text{I.12})$$

V_p : volume de la particule.

Dans le cas d'une sphère :

$$F_t = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho_s - \rho_f) \cdot g \quad (\text{I.13})$$

Avec R , rayon et D , diamètre de la sphère, ρ_s : masse volumique de la sphère, ρ_f : masse volumique du fluide

D'après [Saak et al. 2001], cette force est proportionnelle au seuil d'écoulement et prend la forme :

$$F_t = \tau_0 A_s \quad (\text{I.14})$$

A_s étant la surface de la sphère, τ_0 : seuil d'écoulement du fluide.

Pour maintenir la sphère en équilibre [Saak et al. 2001] propose l'expression de la contrainte de cisaillement minimum

$$\tau_0 \geq \frac{2}{3} g (\rho_s - \rho_f) D \quad (\text{I.15})$$

[Chabra, 1993] a effectué une synthèse des études parues, qui mènent à un critère de stabilité pour une sphère immergée dans un fluide à seuil. Il montre qu'il existe un paramètre adimensionnel caractérisant la stabilité tel que :

$$Y_c = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_f) g D} \quad (\text{I.16})$$

Les valeurs de ce paramètre obtenues par les différents auteurs couvrent une très large gamme $0,04 < Y_c < 0,212$.

Le diamètre minimum D_c de la sphère nécessaire pour dépasser le seuil d'écoulement τ_0 lorsque la sphère n'est pas en mouvement, [He et al. 2001] remarquent que l'exactitude du calcul du diamètre critique D_c dépend de la précision de la mesure du seuil ;

$$D_c = \frac{18 \tau_0}{(\rho_s - \rho_f)g} \quad (I.17)$$

La valeur de la constante de stabilité Y_c diffère selon les auteurs. [Saak et al. 2001] proposent $Y_c=0.66$. Divers études ont donc permis de dégager différentes valeurs de la constante Y_c pour une sphère immergée dans un fluide à seuil de contrainte, sans toutefois en associer une au problème posé. En effet, seule l'étude de [Saak et al. 2001] portait sur une pâte de ciment.

Il s'agit donc, de trouver un compromis entre la nécessité de réduire le seuil d'écoulement pour que l'écoulement s'amorce rapidement et celle d'avoir un seuil suffisant pour supporter le poids des gros granulats. Nous avons vu que la réduction du seuil d'écoulement est obtenue par ajout de superplastifiant. Il s'agit donc de contrôler le dosage en superplastifiant [Flatt, 2004]. De plus, pour un seuil d'écoulement donné, le risque de ségrégation est d'autant plus élevé que le diamètre augmente. Comme pour le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats doit donc être limité.

I.3.1.2- Mouvement d'une particule dans un fluide à seuil

Dans le cas d'un fluide newtonien, il est introduit un coefficient de traînée C_d permettant d'adimensionner la force de traînée, F_{stokes} , tel que :

$$F_{stokes} = C_d \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \rho_f v^2 \quad (I-18)$$

Avec, $C_d=24/R_e$ $R_e = \frac{\rho_f v D}{\mu}$, Le nombre de Reynolds, μ ; étant la viscosité absolue.

Cette équation n'est valable que pour les fluides newtoniens. Certains auteurs ont donc proposé différentes expressions du coefficient de traînée lorsque la sphère est en mouvement dans d'autres fluides. [Chhabra, 1993] donne une revue de ces équations et il apparaît que les différents auteurs arrivent à une même conclusion : dans le cas d'un fluide à seuil, la traînée d'une sphère dépend de deux paramètres : la viscosité et le seuil d'écoulement du fluide.

Ainsi, pour prendre en compte les effets visqueux mais également les effets dus au seuil d'écoulement, les différentes études de chute de particule dans un fluide complexe font intervenir en plus du nombre de Reynolds, le nombre de Bingham :

$$Bn = \frac{\tau_0 D}{\eta_{pl} v} \quad (I-19)$$

Toutefois, ces modèles ne permettent pas de rendre compte du caractère thixotrope des matériaux cimentaires, comportement qui peut être défini comme étant une évolution des propriétés rhéologiques et plus particulièrement une évolution de la viscosité dans le temps. Ainsi, [Ferroir et al. 2004] proposent un modèle permettant de prendre en compte la thixotropie des matériaux cimentaires, et de son influence sur la chute de sphère.

A partir d'un état de structuration du matériau (caractérisé par le paramètre λ), ils définissent les équations (II.10) et (II.11) :

$$\mu = \eta_0 (1 + \lambda^n) \quad (I-20)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{\theta} - \alpha \dot{\gamma} \lambda \quad (I-21)$$

Où n ; est une constante ≥ 1 ,

η_0 ; est la valeur limite de la viscosité correspondant à une déstructuration complète du matériau,

$\lambda \rightarrow 0$, θ ; est le temps caractéristique de l'évolution de la microstructure,

α ; est une constante dépendant du système.

Lorsque la particule est en mouvement, une partie du fluide est sollicitée. D'après [Atapattu, 1995], la première visualisation de l'écoulement faite par Bulina (1967), suggérait l'existence de régions apparemment non déformées (ou stagnantes) liées à l'objet se déplaçant dans le milieu viscoplastique. [Beris et al. 1985] ont prédit numériquement l'allure de la zone entourant une sphère en mouvement dans un fluide comme présenté sur la figure I.8.

D'après [Chhabra, 1993], les parois du récipient contenant le fluide peuvent avoir une influence sur la chute de la sphère lorsqu'elles interfèrent avec la zone cisailée.

D'après [Briscoe et al. 1992], la vitesse de chute serait ralentie lorsque les parois sont proches.

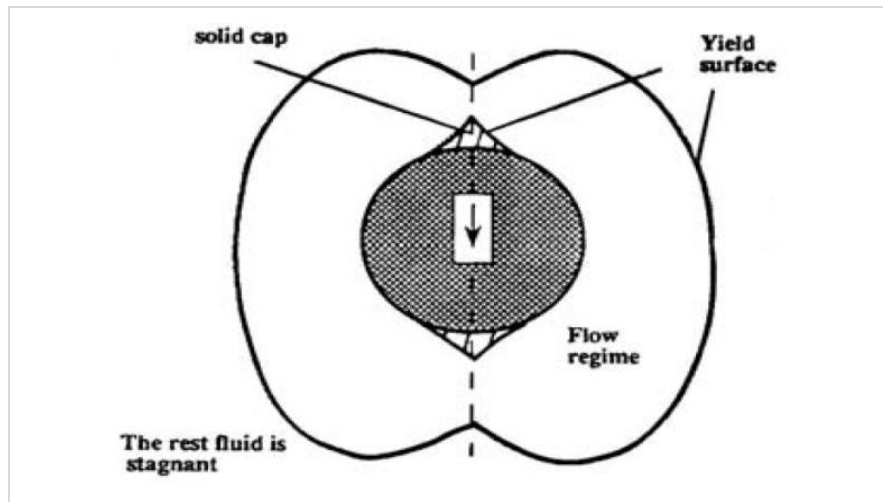


Figure I.8- Champ d'écoulement autour d'une sphère immergée dans un fluide à seuil [Saak et al. 2001]

I.3.1.3- Cas de plusieurs particules sphériques

L'étude du comportement de plusieurs sphères immergées dans un fluide à seuil a fait l'objet de quelques publications, principalement issues du domaine numérique. [Sidky et al.1981] ont montré que les frottements inter-granulaires influencent la vitesse de chute des granulats (ségrégation) par la relation suivante : $v' = kv$

Avec v' : vitesse réelle de chute, v : vitesse de chute sans interaction entre les granulats, et k : coefficient de vitesse dépendant de la concentration en granulats à un moment donné (Γ) et ne dépendant pas de la concentration initiale (Γ_0).

Certains auteurs, tels que [Wallevik, 2003], [Powers, 1968] et [de Larrard, 1998] mentionnent également l'existence d'un phénomène d'interaction entre granulats modifiant le comportement de chacune des particules, sans apporter d'éléments de réponse. Indépendamment du fait que le seuil d'écoulement est une caractéristique essentielle, on peut imaginer que le réseau granulaire a lui-même une influence sur la stabilité des BAP. Or aucunes des différentes études ne traitaient de la stabilité ou de l'initiation de la ségrégation du groupe de particules.

I.4 - Fluidité des bétons.

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant.

I.4.1- Caractérisation empirique

L'essai de référence est l'essai au cône d'Abrams [AFGC, 2002]. Traditionnellement, cet essai, est utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et de définir son caractère plus ou moins plastique (norme NF EN 206). L'affaissement des BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée.

Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

L'essai d'étalement au cône d'Abrams est simple à réaliser et ne demande qu'une faible quantité de matériau (six litre) (figure I.9). Il peut donc être utilisé aussi bien en laboratoire que sur site.

Selon [AFGC, 2002], les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm.

Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- Classe SF1: étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2: étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3: étalement compris entre 760 et 850 mm



Figure I.9- Essai d'étalement au cône d'Abrams

Le résultat d'un essai empirique seul n'est pas suffisant pour décrire convenablement le comportement du béton. Quelques exemples montrent que deux mélanges de béton ayant une même valeur d'affaissement peuvent avoir un comportement différent lors de l'écoulement [Ferraris, 1999], [Khayat, 1999(a)]. Les caractéristiques intrinsèques des matériaux doivent donc être déterminées.

I.4.2- Mesures rhéologiques.

Les mesures réalisées sur bétons, [NIST, 2001], [Wallevik, 2003] 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.

[Ferraris, 1999], déclare que les mesures rhéologiques sont délicates à réaliser dans le cas des bétons, du fait de l'étendue des tailles des particules qui les composent

(de 1 μm à 15 mm voire 20). En effet, les appareils généralement utilisés par les rhéologues servent à caractériser des gels modèles, le sang ou divers fluides composés de particules nanométriques. Ils ne sont pas adaptés aux mesures sur béton du fait de la taille d'un échantillon représentatif. Différents rhéomètres à béton ont été mis au point mais ils sont difficilement comparables entre eux car leurs modes de mesure et leurs géométries sont variables. L'utilisation d'un matériau modèle de référence permettrait de calibrer ces rhéomètres, mais à l'heure actuelle on ne dispose pas de matériau de ce type pour simuler le comportement des bétons [NIST, 2001].

Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons, dont une revue est proposée par [Ferraris, 1999]. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley représentés sur la figure I.10.

$$\text{Modèle de Bingham:} \quad \tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (\text{I.22})$$

$$\text{Modèle de Herschel -Bulkley : } \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.23})$$

$n < 1 \rightarrow$ fluide rhéo-fluidifiant.

$n = 1 \rightarrow$ fluide de Bingham.

$n > 1 \rightarrow$ fluide rhéo-épaississant.

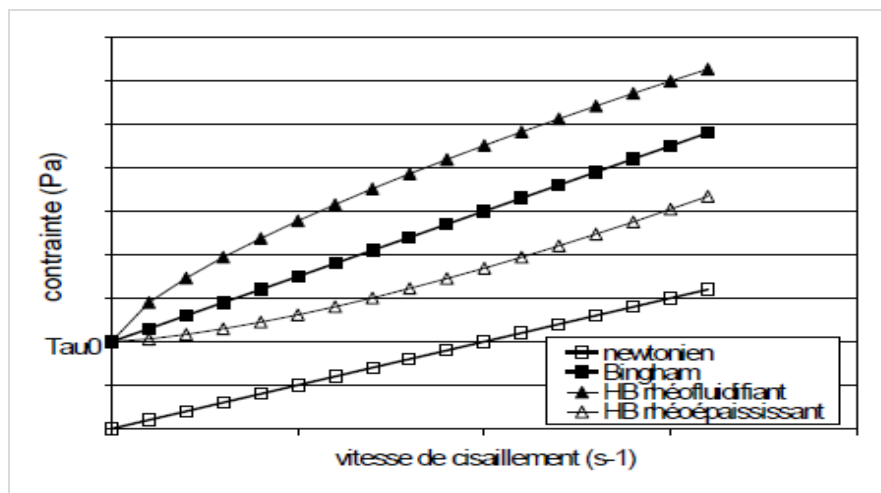


Figure I.10- Modèles rhéologiques

Avec τ_0 , Seuil d'écoulement,
 η_{pl} , Viscosité plastique,
 K , Coefficient de viscosité,
 n , Indice.

De Larrard, Ferraris et Sedran [de Larrard et al ,1998] ont montré que les paramètres K et n du modèle de Herschel-Bulkley étaient liés, donc que ce modèle ne contenait en

fait que deux paramètres indépendants. Ils proposent un modèle de Bingham «modifié», issu de l'exploitation des mesures rhéologiques selon le modèle de Herschel-Bulkley. La valeur du seuil d'écoulement obtenue avec le modèle de Herschel-Bulkley est conservée, mais la courbe d'écoulement est remplacée par une droite obtenue par régression linéaire. Un exemple de résultats obtenus par cette méthode est présenté sur la figure I.11.

La réalisation de mesures rhéologiques sur béton est difficile et la prise en compte d'un grand nombre de paramètres est indispensable pour obtenir une interprétation du comportement du béton la plus réaliste possible. De plus, les mesures dépendent du protocole de cisaillement : taux de cisaillement, température, énergie de malaxage, etc. [Ferraris et al, 1998]. Les rhéomètres doivent, par ailleurs, répondre à différents critères (notamment les dimensions du bol) et certains rhéomètres présentés ci-dessus ne semblent pas être parfaitement adaptés [NIST, 2001], [Sedran, 1999].

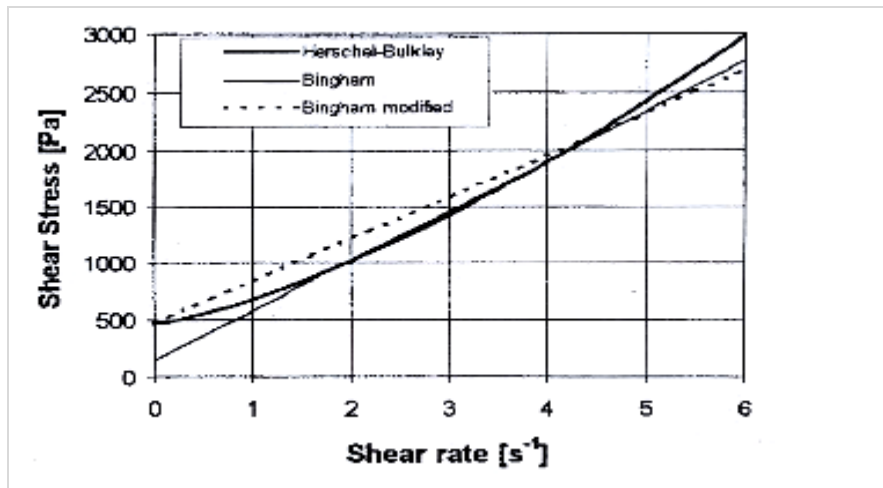


Figure I.11. Modèle de Bingham modifié [de Larrard et al ,1998]

Cependant quelle que soit l'approche employée (empirique ou physique) les propriétés des BAP se différencient notablement des celles des bétons traditionnels. D'une part, l'affaissement n'est plus mesurable puisqu'il est total, on parle donc d'étalement des BAP.

D'autre part, malgré le fait que la réalisation d'essais rhéologiques est difficile, et que le choix d'un modèle adapté est encore discuté, les différentes données indiquent que la valeur du seuil d'écoulement des BAP est bien plus faible que celui des autres bétons [Wallevik, 2003], [Sedran, 1999]. Les caractéristiques rhéologiques étant mobilisées lors des essais d'étalement ou d'écoulement, nous allons maintenant nous intéresser aux relations existant entre les approches empiriques et physiques.

I.4.3- Corrélation entre les essais empiriques et les mesures rhéologiques

Une relation semble pourtant exister entre le seuil d'écoulement et l'étalement d'un BAP.

Kurokawa, d'après [Jin, 2002], et Sedran [Sedran, 1999] ont d'ailleurs proposé des expressions permettant d'estimer le seuil d'écoulement (τ_0) d'un BAP à partir de la mesure d'étalement (D) au cône d'Abrams.

Kurokawa obtiendrait la relation,

$$\tau_0 = \frac{\rho g V_{\text{cône}}}{25\sqrt{3}\pi D} \cdot 10^8 \quad (\text{I.24})$$

ρ ; la masse volumique du béton, g ; accélération de la pesanteur et $V_{\text{cône}}$; volume du cône d'Abrams.

Sedran, [Sedran, 1999] propose, à partir du lissage linéaire de ses résultats expérimentaux présentés sur la figure I.12, l'équation suivante :

$$\tau_0 = (808 - D) \rho / 1174 \quad (\text{I.25})$$

Avec ; ρ , la masse volumique du béton et

τ_0 , seuil mesuré au BTRHEOM (*Rhéomètre développé pour les bétons*).

Les cercles correspondent à des bétons saturés en adjuvant et contenant un retardateur de prise, les triangles correspondent à des bétons contenant du filler calcaire et du super plastifiant [Wallevik, 2003].

Jin [Jin, 2002] a comparé ses propres résultats expérimentaux avec les expressions de Kurokawa et de Sedran.

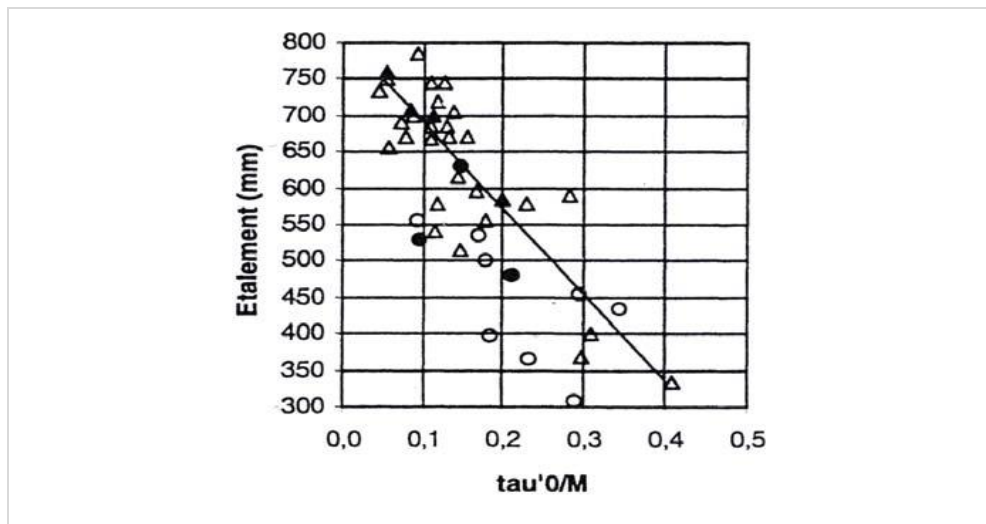


Figure I.12- Relation entre l'étalement et le seuil d'écoulement rapporté à la masse volumique (notée M) [Wallevik, 2003].

Les seuils de cisaillement étant mesurés avec un autre type rhéomètre « Two-point test », il a repris les relations obtenues par le NIST [NIST, 2001], pour pouvoir caler l'expression de Sedran définie pour un seuil d'écoulement mesuré au BTRHEOM. Il obtient alors une nouvelle expression, en remplaçant le terme τ_0 de l'équation de Sedran par,

$$\tau_{0 (two-point)} = 0.54\tau_{0 (BTRHEOM)} - 153.9$$

Cette expression qu'il nomme « équation de Sedran modifiée » est alors plus proche de ses résultats expérimentaux (figure I.13).

Les différentes études issues de la littérature montrent que la relation entre le seuil d'écoulement d'un BAP et son étalement, même si elle existe, semble difficilement quantifiable. Ceci pourrait s'expliquer par la différence entre les modes de mesures, un manque de sensibilité des appareils utilisés, ou encore par la difficulté de modéliser le comportement du matériau.

Dans le cas des bétons traditionnels, la relation affaissement-seuil d'écoulement a clairement pu être mise en évidence [Hu, 1995], [de Larrard et al ,1998] et [Sedran, 1999] mais pour ces bétons, les valeurs de seuil sont bien plus élevées donc moins proches de la précision des appareils.

L'existence d'une telle relation a également été mise en évidence dans le cas des mortiers et des pâtes de ciment [Jin, 2002] et [Emborg, 1999]. Notons que pour ces matériaux, les rhéomètres et/ou les géométries utilisées pour les mesures ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour les bétons.

Afin de mieux appréhender les propriétés des bétons, les mécanismes conférant au matériau sa fluidité sont présentés dans le paragraphe suivant.

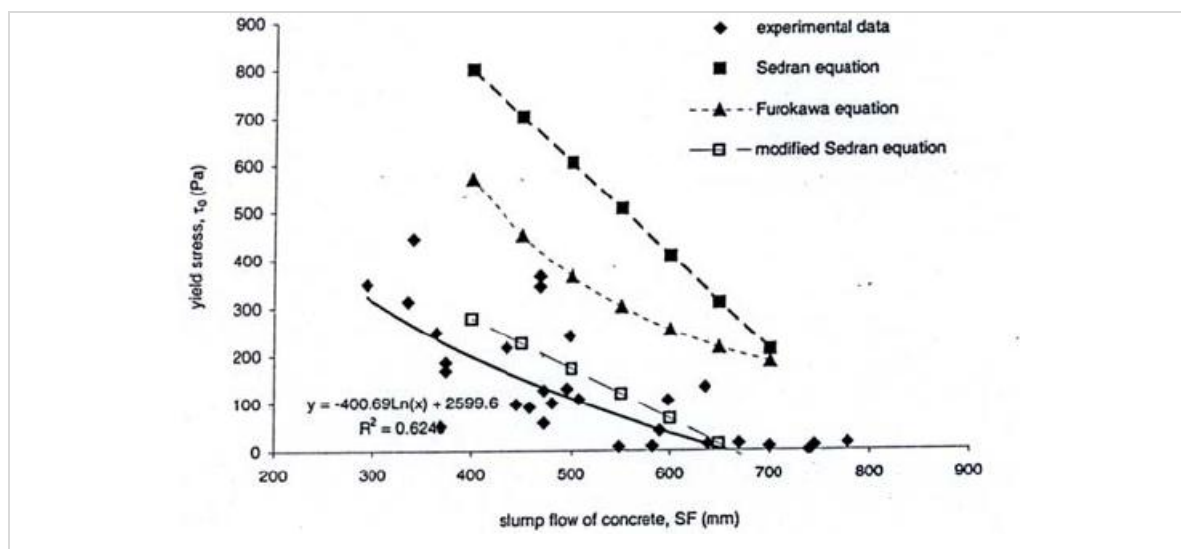


Figure I.13- Comparaison entre des points expérimentaux et différentes expressions permettant de déterminer le seuil d'écoulement à partir de l'étalement [Jin, 2002]

I.4.4- Mécanismes générant la fluidité

I.4.4.1- Théorie de l'excès de pâte

Vers 1940, Kennedy a proposé, une théorie permettant de comprendre l'origine de l'ouvrabilité d'un béton, d'après [Powers, 1968]. En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité de pâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité (figure I-14).

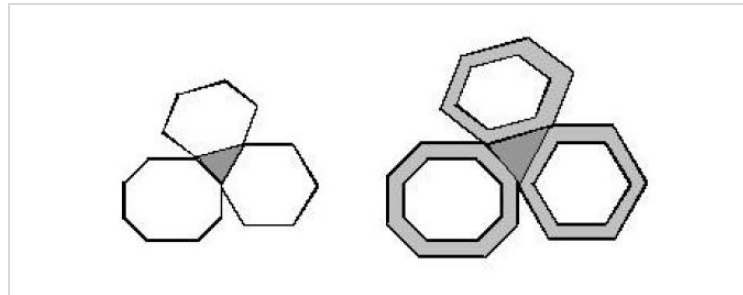


Figure I.14- Dispersion des granulats par excès de pâte.

L'Association française de Génie Civil [AFGC, 2002] ne donne pas de recommandations particulières sur, l'influence de la forme des granulats sur la fluidité, et déclare que des granulats roulés ou concassés peuvent être utilisés dans les bétons. Il est généralement admis que les granulats ronds confèrent au béton une plus grande ouvrabilité.

Certains auteurs ont effectivement mis en évidence l'existence d'une relation entre la quantité de pâte de ciment et l'étalement du béton [Su et Miao, 2003], [Yen et al, 1999] (figure I.15).

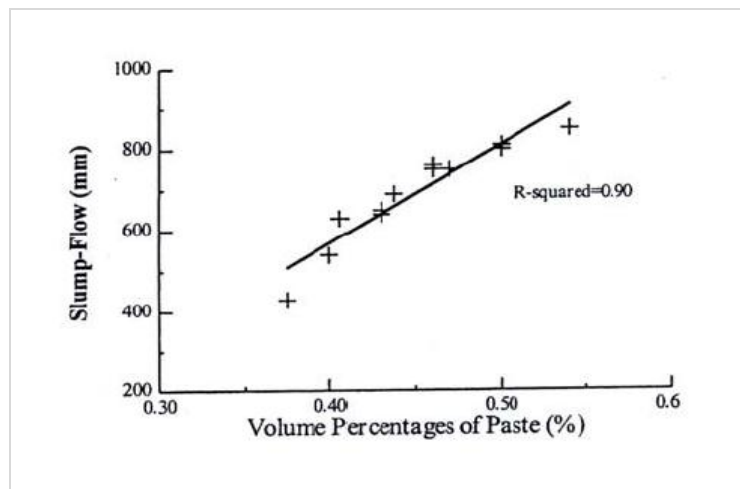


Figure I.15 - Relation entre l'étalement et la quantité de pâte d'un béton. [Yen et al, 1999].

Cette relation ne concerne pas seulement les plus gros granulats et se retrouve à l'échelle des grains de sable. Ouchi et al. [Ouchi et al, 1999] considèrent en effet que lorsque le béton se déforme, le mortier se déforme également sous l'effet du rapprochement des granulats. D'après eux, la résistance au cisaillement du mortier augmenterait en fonction de l'effort normal engendré par ce rapprochement et serait dépendante de la quantité de particules fines contenues dans le mortier (figure I.16-a). En d'autres termes, moins il y a de frottements entre les grains de sable, plus le mortier s'écoule facilement et donc plus le béton lui-même s'écoule facilement (figure I.16-b).

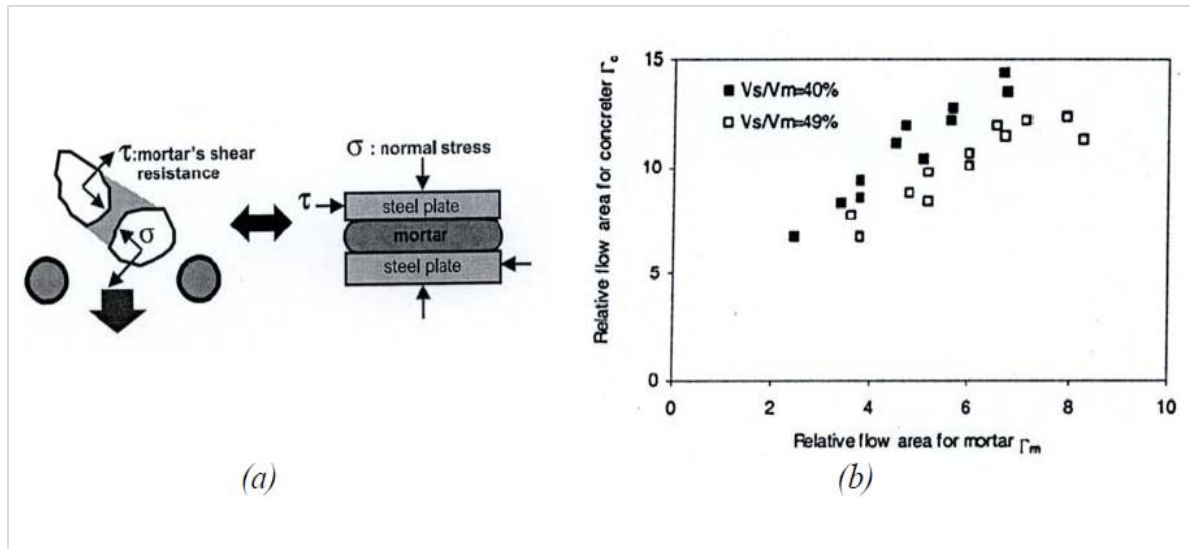


Figure I.16 - (a) Mécanisme de déformation du mortier sous l'action du rapprochement des granulats, (b) Comparaison entre l'étalement du béton et celui du mortier en fonction de la fraction volumique de sable contenue dans le mortier.

[Yen et al. 1999] mettent en évidence un phénomène similaire. Pour un même dosage en gros granulat (pour un rapport eau sur liant (E/l) et un dosage en super plastifiant constants) plus la quantité de sable est faible, plus l'étalement du béton est important.

Or certains auteurs ont montré que l'étalement n'est pas uniquement lié à la quantité de pâte.

En effet, [Pedersen et Smeplass, 2003] ainsi que [Van Bui et al. 2002] ont mis en évidence le fait que plus, le seuil de la matrice, est faible et moins il faut de pâte pour obtenir un étalement donné (figure I-17). Ainsi l'étalement d'un BAP est non seulement dépendant de la quantité de pâte qui permet de réduire les frottements entre les granulats (sable et gravillons) mais également de la fluidité de la pâte. Or la fluidité de la pâte est elle-même liée à des frottements inter granulaires.

D'après [de Larrard, 1996], le seuil d'écoulement ne serait pas gouverné par la phase liquide, dont le rôle n'est que de définir un espace moyen entre les particules, mais il serait dépendant du nombre et de la nature des contacts entre particules. Il propose une

interprétation physique du modèle de Bingham (cf. figure I.11) proposée par Ferraris, cité dans [Ferraris, 1999], en supposant que le béton est un mélange granulaire suspendu dans l'eau, donc que tous les grains (granulats, sable, ciment) appartiennent à la phase solide.

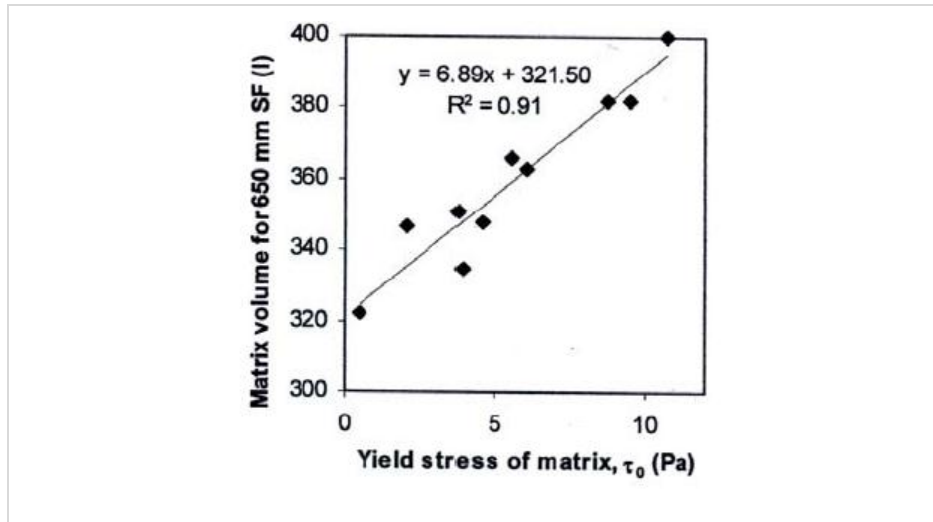


Figure I.17- Relation entre le seuil d'écoulement de la matrice cimentaire et la quantité de pâte requise pour obtenir un étalement de 650 mm [Pedersen et Smeplass, 2003].

Le terme de seuil, τ_0 , apparaît comme étant la contribution de la phase solide et le terme $\eta_{pl} \dot{\gamma}$ comme celle de la phase liquide. L'auteur précise cependant que le degré de défloculation peut varier avec la vitesse de cisaillement et modifier la circulation du fluide. La viscosité est donc dépendante du gradient de vitesse ce qui explique que le comportement généralement observé est non linéaire donc plus proche du modèle de Herschel-Bulkley.

De plus, les travaux de [Mansoutre, 2000], portant sur la caractérisation de pâtes de C3S, montrent que la contribution de la phase solide au seuil d'écoulement est liée à deux phénomènes, mis en évidence en fonction de la concentration volumique sur la figure I.18.

Le seuil d'écoulement provient :

- d'une contribution essentiellement physico-chimique τ_{int} liée aux forces de surface entre les grains lorsque la fraction volumique est inférieure à 38%.
- à laquelle s'ajoute une contribution granulaire τ_{fr} prenant en compte les forces de frottements entre les grains lorsque la fraction volumique augmente.

Les différents auteurs [de Larrard, 1996], [Sedran, 1999], [Mansoutre, 2000], [Toutou, 2002] décrivent donc le seuil d'écoulement comme étant la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton. Donc s'il existe une relation entre le seuil d'écoulement et les frottements intergranulaires, il existe une relation entre le seuil et la quantité de fluide suspendant

puisque les frottements dépendent de la quantité de pâte. Or nous avons vu que l'étalement dépend également de la quantité de pâte. Il existe donc bien une relation entre l'étalement d'un BAP et son seuil d'écoulement.

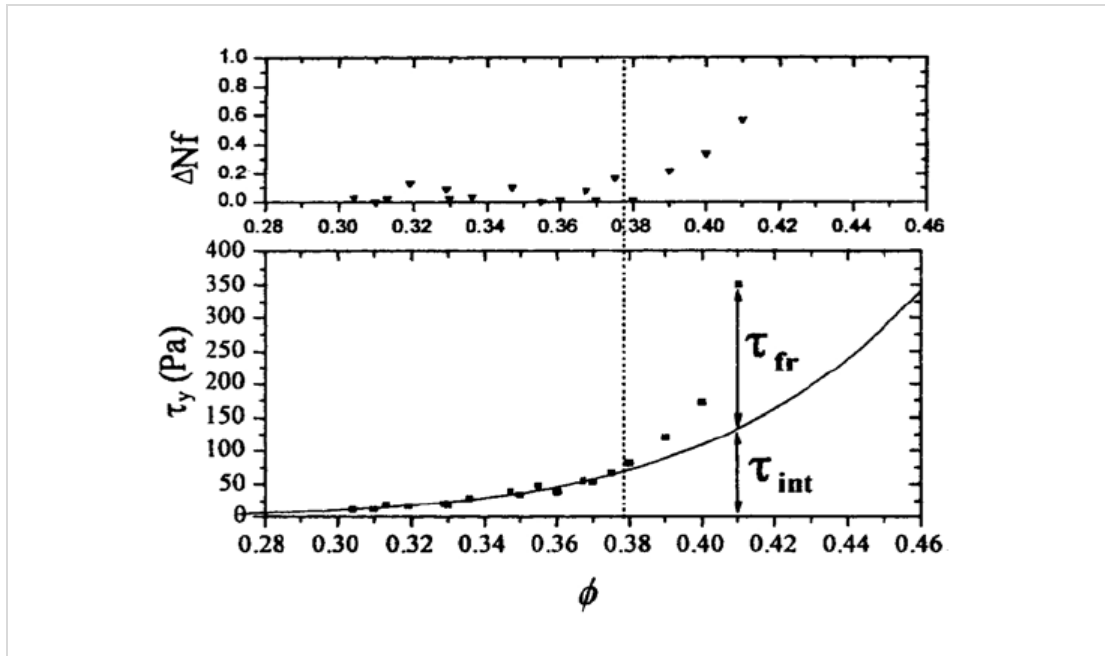


Figure I.18- Evolution du seuil d'écoulement et du saut de force normale en fonction de la fraction volumique de pâtes de C3S [Mansoutre, 2000]

Les études précédentes montrent qu'à différentes échelles (pâte de ciment, mortier), il existe une relation entre le seuil d'écoulement et l'étalement et que les frottements inter- granulaires jouent un rôle essentiel dans les mécanismes mis en jeu. La question qui se pose alors est de savoir si les études sur pâte ou sur mortier peuvent servir à prédire le comportement du béton.

La réalisation d'essais sur pâte de ciment ou sur mortier présente en effet de nombreux intérêts, et notamment ceux de réduire la quantité de matériau à tester, la main d'œuvre et le temps nécessaire pour le caractériser.

I.4.4.2- La phase fluide d'un béton.

On peut se dire quelle est la phase fluide participant à la mobilité du béton. Le béton est généralement considéré comme un mélange bi-phasique, constitué d'une phase granulaire et d'une phase fluide.

Mais, il subsiste un problème de distinction entre les phases, laquelle est généralement effectuée sur des considérations granulométriques (la séparation s'établissant aux alentours de 80 μm) ou sur l'évolution pendant la prise (qui n'affecte en principe que la pâte), comme l'évoque [de Larrard, 1996].

La prédiction du comportement d'un béton à partir des propriétés de sa pâte de ciment semble difficile. En effet, [Nehdi et al ,2004] et [Ferraris, et al, 1992] ont montré que le comportement rhéologique apparent, mais surtout la valeur du seuil d'écoulement d'une pâte de ciment dépendait de la distance entre les plateaux d'un rhéomètre simulant la distance entre les granulats. Plus les plateaux sont rapprochés, plus la valeur du seuil est élevée. Donc pour prédire le comportement d'un béton à partir de sa pâte de ciment, il faut caractériser la pâte dans les conditions auxquelles elle serait soumise en présence de granulats. Il s'agit donc d'estimer la distance entre les granulats dans un béton, ce qui ne semble pas facilement réalisable. [Van Bui et Montgomery, 1999] ont proposé un calcul fonction du volume de pâte et du diamètre moyen des granulats (ensemble sable et gravillons). Ils obtiennent des distances entre granulats comprises entre 0,3 et 0,4 mm. D'après [Ferraris, et al, 1992], la distance de séparation serait de l'ordre de 0,2 mm. Par ailleurs, le sable contient une certaine quantité de fines. Le comportement d'une pâte de ciment et le comportement de la phase suspendante d'un mortier (pâte de ciment et fines du sable) ont de fortes chances d'être différents. Ainsi, pour formuler les bétons à hautes performances par la méthode des coulis de l'AFREM [De Larrard et al, 1996] tous les éléments inférieurs à 2 mm sont pris en compte.

Une étude préliminaire sur pâte peut donc être intéressante pour choisir des constituants et éventuellement appréhender leurs interactions, mais elle ne permettra pas de prédire complètement le comportement du béton car le rôle des grains de sable ne peut être négligé. Une approche sur mortier semble alors plus rationnelle.

Jin [Jin, 2002] a comparé les comportements de BAP et ceux des mortiers directement issus de leur composition, c'est-à-dire formulés en n'enlevant que les gros granulats (5/20 mm). Il obtient une bonne corrélation entre les mesures d'étalements respectifs (figure I.19-a). De même, l'étalement et le seuil d'écoulement du mortier sont bien corrélés (figure I.19- b).

Cette différence de comportement entre un béton et le mortier qui le compose peut s'expliquer comme dans le cas des pâtes de ciment par le fait que les gros granulats ont une influence sur la réponse rhéologique du matériau et que les gros granulats contiennent une certaine quantité de fines. Un mortier étudié seul et le mortier d'un béton n'ont probablement pas le même comportement.

Selon un projet français Calibé [PNC, 2001], La technique du Mortier de Béton Equivalent (MBE) apparaît, comme, une alternative particulièrement intéressante. Le principe est de considérer qu'il existe une corrélation simple entre les propriétés rhéologiques du béton et celles du mortier qui le compose (figure I.20). Mais le mortier jouant un rôle sur la rhéologie du béton n'est pas directement déduit de la

formule de béton. En effet, dans un béton, une partie de la pâte et des grains de sable adhèrent aux gravillons et ne participent donc pas à la rhéologie.

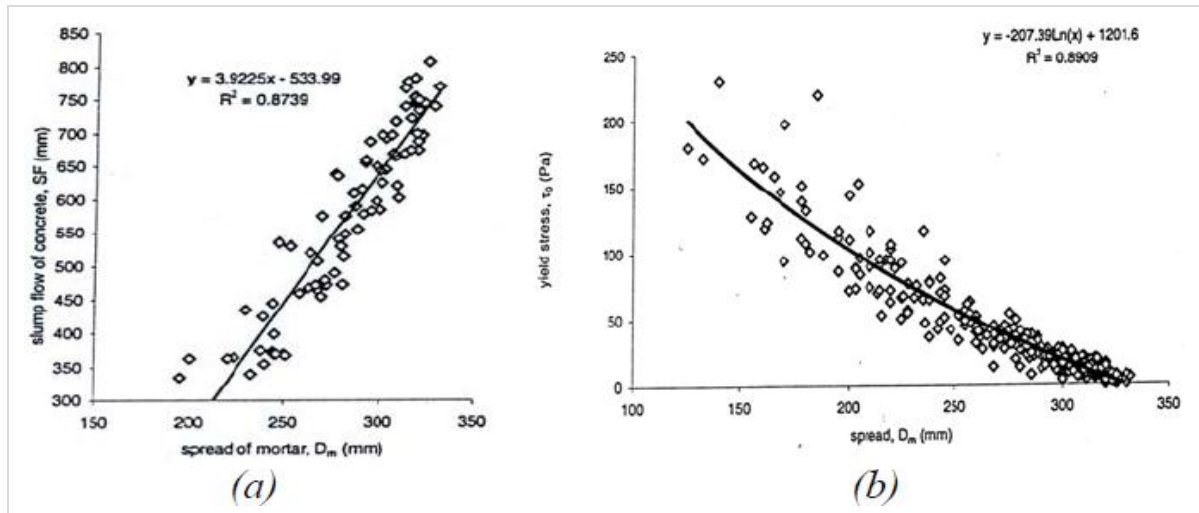


Figure I.19- (a) Corrélation entre l'étalement d'un béton et celui de son mortier.
(b) corrélation entre l'étalement du béton et le seuil d'écoulement de son mortier.

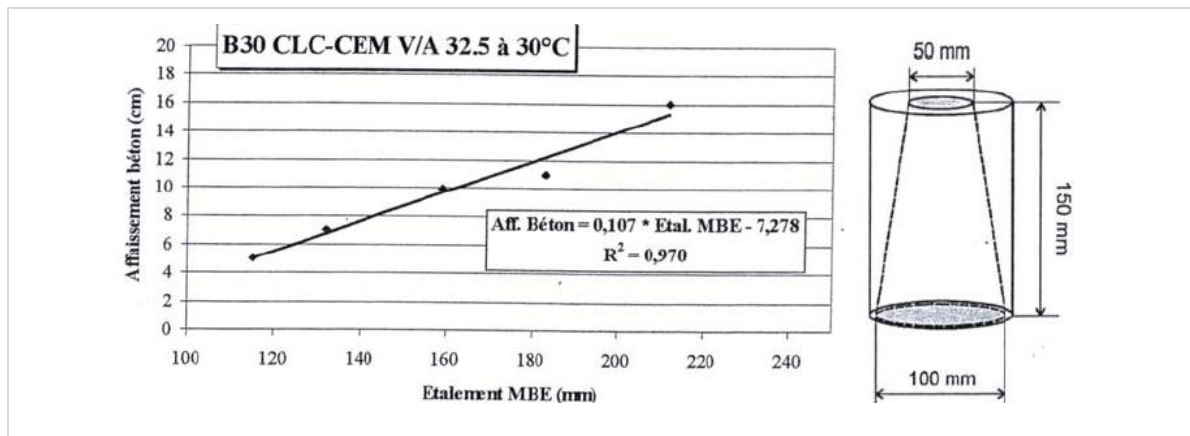


Figure I.20- Corrélation entre l'étalement d'un MBE et l'affaissement du béton et dimensions du cône MBE, homothétique du cône d'Abrams [PNC, 2001]

Le MBE correspond à la partie du mortier participant à la rhéologie. Il est équivalent au mortier qui serait obtenu en tamisant le béton frais au tamis de 5 mm. La composition du MBE, conduisant aux mêmes propriétés que celles du mortier tamisé, est déduite de celle du mortier du béton en corrigeant la quantité de sable afin que la surface granulaire du MBE soit la même que celle du béton. Il reste certaines limites d'emploi pour lesquelles la méthode n'est plus valable ou pour lesquelles des études sont à poursuivre, notamment pour des bétons ayant un affaissement supérieur à 25 mm, ou pour des gravillons présentant une teneur en fines élevée [PNC, 2001]. La question de l'existence d'une méthode permettant de prédire le comportement d'un béton à partir d'une pâte de ciment ou d'un mortier ne semble donc pas totalement résolue. Le principal problème étant que la granulométrie d'un béton est généralement

continue et donc que la distinction entre les phases n'est pas simple. Par ailleurs, la contribution des grains de plus grosse taille que les grains de la phase suspendante ne peut être négligée.

I.5 - La ségrégation des bétons.

I.5.1- Problème de la ségrégation

Le problème de la ségrégation se rencontre dès que l'on manipule des mélanges de grains de propriétés différentes. A la différence des liquides qu'il est souvent facile de mélanger, un mélange homogène de grains est difficile à obtenir dès qu'il existe des différences de tailles, de masses, de propriétés mécaniques (friction . . .). Parmi les différents mécanismes empêchant un bon mélange, la ségrégation due à la différence de taille est de loin le plus efficace. Nous présentons ici quelques configurations donnant lieu à de la ségrégation et qui ont été très étudiées.

I.5.2 - Ségrégation sous vibrations.

Lorsque l'on fait vibrer un milieu granulaire poly-disperse, les gros grains se retrouvent souvent à la surface libre. La ségrégation par vibrations a donné lieu à de nombreuses expériences qui ont exhibé l'existence de plusieurs mécanismes pouvant expliquer la remontée des grosses particules.

I.5.3 - Ségrégation en écoulement

Considérons un mélange homogène de gros et petits grains que l'on fait s'écouler sur un plan incliné rugueux. Très rapidement le long de la pente, les gros grains remontent à la surface libre. Le mécanisme est assez simple, Lors de l'écoulement les grains bougent continuellement les uns par rapport aux autres et des trous se forment entre eux dans lesquels des particules de la couche du dessus peuvent tomber. Les gros grains ne peuvent tomber que dans les gros trous, tandis que les petits grains peuvent tomber dans les petits et gros trous. Cette asymétrie dans les mouvements fluctuants d'échanges de couches donne lieu à la ségrégation, Figure I.21.



Figure I.21- Figures de digitation observées au front d'un écoulement contenant des grosses particules.

I.5.4 - Ségrégabilité

Pour limiter autant que possible la ségrégation des granulats, des exigences strictes sur la formulation du béton sont à respecter :

- le seuil de cisaillement et la viscosité de la phase suspendante doivent être suffisamment élevés pour contrecarrer les forces liées à la sédimentation [Miura *et al.* 1993]. La densité d'une pâte de ciment sera toujours plus faible que celle des granulats, ce qui d'après le principe d'Archimède ne peut assurer l'équilibre des plus gros grains dans une suspension de ciment si les dissipations visqueuses de la matrice ne sont pas suffisantes pour ralentir leur chute. [Umehara *et al.* 1994] montrent en effet qu'une diminution progressive de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation ;
- le squelette granulaire doit avoir une étendue granulaire poly disperse afin de mieux jouer l'effet d'échelle qui serait obtenu par un mélange stable de petites et moyennes tailles de particules, entre $63 \mu\text{m}$ et 2mm) limitant la chute des plus gros gravillons ;
- la concentration en inclusions granulaires doit être relativement faible pour limiter les frottements granulaires et la possibilité de sédimentation [Miura *et al.* 1993]. En effet, les collisions et les frictions inter-granulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats [Ozawa *et al.* 1995].
- le béton doit présenter une bonne thixotropie, qui peut sous certaines conditions limiter la sédimentation ;
- la teneur en eau ajoutée doit suffire uniquement à la maniabilité, et aux éventuels apports dus à la présence des granulats plus ou moins secs.

Un cisaillement peut modifier la stabilité d'un béton, en particulier si le volume de matrice est faible par rapport au volume de granulats. La qualité rhéologique de la matrice cimentaire est aussi un facteur important. La résistance à la ségrégation du béton dépend fortement des propriétés du fluide porteur du béton qu'est la pâte de ciment ou le mortier, suivant l'échelle considérée.

Toute fois, la compacité maximale d'un squelette granulaire ne conduit pas forcément à la ségrégabilité minimale. La ségrégation est minimisée en augmentant les classes intermédiaires au détriment de la plus grossière. Si chaque classe granulaire occupe l'espace inter-granulaire lui conférant sa compacité maximale afin d'obtenir une granularité de l'ensemble la plus continue, le mélange sera plus résistant à la ségrégation par rapport à un mélange de granularité discontinue [de Larrard, 2000]. Une distribution granulaire poly-disperse discontinue sera plus sujette à une ségrégation de taille du fait de l'arrangement des grains les uns par rapport aux autres, subissant des accélérations par gravité, des chocs externes ou de la vibration.

Corollairement à cela, les propriétés géométriques des granulats tels que la forme et l'état de surface jouent aussi un rôle important dans l'écoulement du béton et de la stabilité granulaire.

Une ségrégation importante par séparation de phase dans le béton peut engendrer des variations spatiales tant au niveau mécanique qu'au niveau des variations dimensionnelles du retrait. Ce dernier pouvant provoquer à son tour des fissures qui affaiblissent la durabilité de la structure.

I.6 - La caractérisation de la ségrégation.

I.6.1- Introduction

La stabilité du béton est une caractéristique essentielle puisqu'elle permet de garantir la durabilité de la structure et l'homogénéité des propriétés mécaniques une fois le matériau durci. S'il y a instabilité, c'est à dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de *ségrégation dynamique*. La *ségrégation statique* peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise. La ségrégation n'est pas visible sur les parements sauf si elle s'accompagne de ressuage. Il est donc nécessaire de s'assurer en amont de la stabilité du béton et de disposer d'essais de vérification avant coulage.

Il s'agit de trouver un compromis entre deux caractéristiques qui peuvent sembler contradictoires : fluidité et stabilité.

I.6.2 - Essais de caractérisation de la ségrégation.

I.6.2.1- Ségrégation dynamique

Capacité d'écoulement à travers des armatures plus ou moins denses, différents essais sont disponibles dont on cite ; L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, l'essai à la boîte en L « L-Box », l'essai à la boîte en U (U-Box), J-ring test...

I.6.2.1.1- Essais de caractérisation de l'aptitude au remplissage des bétons

I.6.2.1.1.1- Mesures rhéologiques au cône d'Abrams.

La maniabilité des bétons sera caractérisée de manière traditionnelle par l'affaissement au cône d'Abrams (Figure I.22.). Pour ces bétons, la procédure de remplissage du béton dans le cône se fait par tranches de tiers de volumes du matériau et en piquant jusqu'à 25 coups au total jusqu'à la fin du remplissage pour bien tasser le béton dans le cône. Pour des bétons plus fluides, l'essai au cône fournit une mesure d'étalement. Dans ce cas, le remplissage du cône se fait d'un seul trait. Si les effets d'inertie peuvent être négligés, il est généralement admis que l'écoulement s'arrête lorsque la contrainte dans le béton testé devient inférieure ou égale à la contrainte seuil du béton [Schowalter et Christensen, 1998]. Dans la plupart des utilisations du cône d'Abrams,

la hauteur initiale du cône étant de 30 cm, la mesure de l'affaissement est considérée si après soulèvement du cône l'affaissement est inférieur à 25 cm. Pour des affaissements supérieurs, l'étalement est mesuré (généralement pour les bétons autoplaçants).

Il est admis [Roussel et Coussot, 2006] que dans le cône il existe deux zones d'écoulement : au-dessus d'une certaine hauteur critique, la contrainte de cisaillement reste inférieure à la contrainte seuil et il n'y a pas d'écoulement. En-dessous de la hauteur critique, la contrainte de cisaillement induite par la pression exercée par le poids du béton situé au-dessus, est plus élevée que la contrainte seuil. Dans cette région, le béton s'écoule par couches successives qui s'étalent jusqu'à ce que la contrainte appliquée sur le matériau devienne égale à celle de la contrainte seuil du béton, marquant l'arrêt de l'écoulement. [Murata, 1984] donne une relation, entre la mesure de l'affaissement et le seuil du béton, qui ne dépend pas de la forme géométrique du cône. Plusieurs chercheurs ont tenté de trouver une relation entre l'affaissement et la contrainte seuil par des méthodes empiriques et théoriques [Hu et de Larrard, 1996], [Roussel et Coussot, 2006].

Hu, propose une relation générale de la forme :

$$\tau_0 = (30 - S)/27 \quad (I.26)$$

Où ρ est la masse volumique exprimée en kg/m^3 , τ_0 en Pa et S en cm. Cette corrélation est valide pour des affaissements entre 5 et 25 cm. Finalement, pour des consistances de bétons fermes, l'affaissement du béton sera corrélé au seuil τ_0 d'après cette expression.

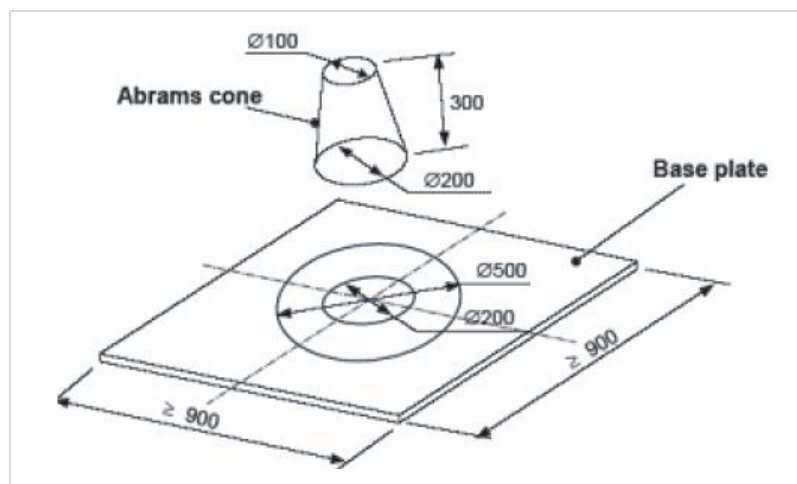


Figure I.22 - Dispositif d'essai de mesure de la fluidité du béton : le cône d'Abrams.

I.6.2.1.2 - Essais de caractérisation de la capacité de passage des bétons.

I.6.2.1.2.1- L'essai à la L-Box.

L'essai de la boîte en L (figure I.23) permet de tester la mobilité d'un béton frais de volume 12 litres, dans un milieu confiné et à travers des armatures d'acier. Ce test permet d'évaluer le taux de blocage du béton lors du passage entre les armatures d'acier (ici 3 barres de diamètres 14 mm utilisées pour les BAP), et d'estimer la capacité de passage et l'aptitude du béton à traverser une zone fortement ferrillée. Recommandé par [AFGC, 2002],

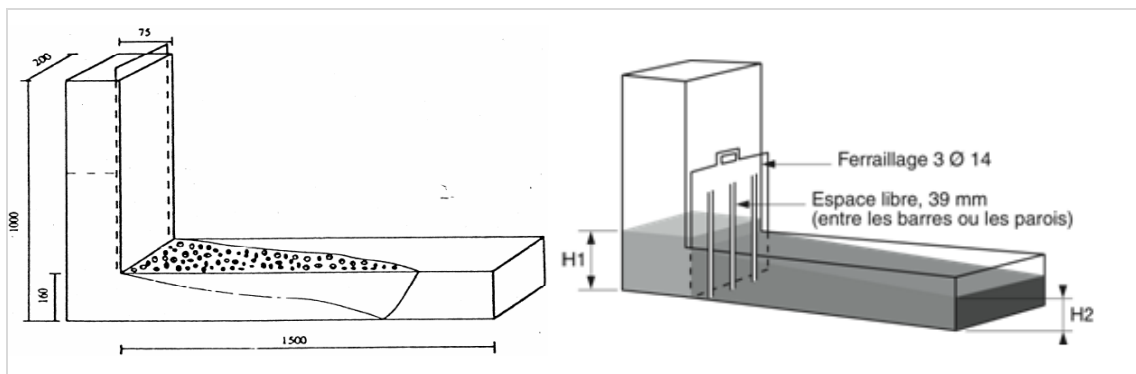


Figure I.23 - Essais d'écoulement à travers des armatures « à la L-Box ».

Dispositif d'essai :

Constitué d'une boîte en forme de L (figure I.23). La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe [AFGC, 2002] recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm.

Mode opératoire de l'essai

1. La partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13l).
2. Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min.
3. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage.
4. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement $H1$ et $H2$).

Le rapport $H2/H1$ permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et une accumulation de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

Toutefois, [Nguyen *et al.* 2006] montrent que l'écoulement dans la boîte est dominé par les effets d'inertie liés à la vitesse de soulèvement de la trappe. Des prédictions

théoriques de la forme du matériau à la fin de l'écoulement ont été corrélées avec succès à des résultats expérimentaux dans le cas de suspensions de fillers calcaires.

I.6.2.1.2.2- L'essai à la boîte en U (U-Box)

Présenté sur la figure I.24, utilisé au Japon et en Angleterre,

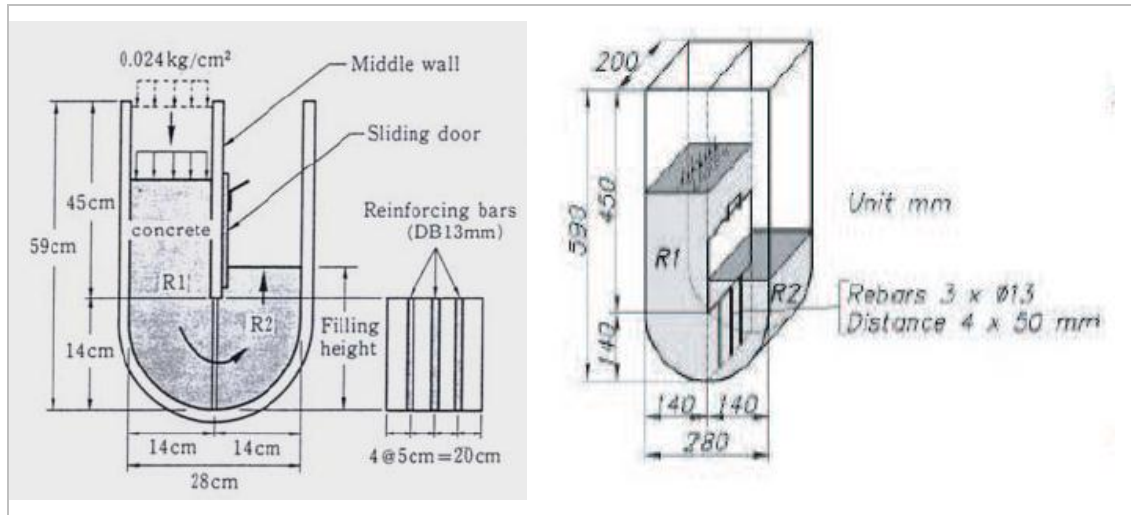


Figure I.24 - Essais d'écoulement à travers des armatures « a la U-Box ».

Le principe de l'essai est sensiblement le même que pour la boîte en *L*. Le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte. Une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise [Jin, 2002].

Différentes versions de la forme de la boîte existent : fond arrondi ou fond aplati.

I.6.2.1.2.3- L'essai J-ring.

Il s'agit d'un anneau sur lequel différentes armatures peuvent être fixées, figure I.25.

Ce matériel est utilisé conjointement avec un essai d'étalement au cône d'Abrams, un essai d'écoulement à l'Orimet-test ou éventuellement un essai au V-funnel.

D'après [EFNARC, 2002], la combinaison de ces essais est intéressante mais on ne sait pas encore comment interpréter les résultats. Par exemple, il est possible de comparer un essai d'étalement seul et un essai combiné : étalement et J-ring. La différence entre les étalements obtenus ne doit pas être supérieure à 50 mm [EFNARC, 2002]. Il est également possible de mesurer la différence entre les hauteurs de matériau obtenues à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Mais cette opération est délicate à réaliser et peu précise.

D'après la [RILEM.TC145], il serait plus intéressant d'utiliser le J-Ring avec l'Orimet-test. En effet, différentes informations seraient recueillies : le temps

d'écoulement à l'Orimet-test que l'on peut relier à la viscosité et l'étalement du béton à travers les armatures indiquant un éventuel blocage.

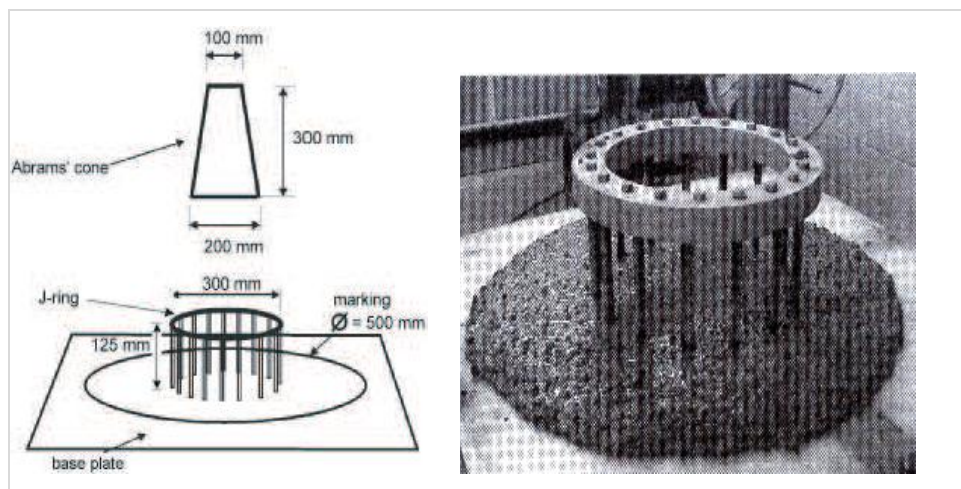


Figure I.25- Essais d'écoulement à travers des armatures « a la J-ring».

Donc la ségrégation dynamique est une séparation entre les granulats et la phase suspendante lors de l'écoulement. Certaines précautions de formulation, telles que la réduction du diamètre maximal des granulats, peuvent permettront de limiter les risques de blocage au droit des armatures. Cette ségrégation dépend principalement de la viscosité du matériau qui permet d'entraîner correctement les granulats lors de l'écoulement. (La viscosité dépendait de la fraction volumique). Or cette caractéristique doit être suffisamment faible pour que le matériau s'écoule avec un débit relativement important.

Une nouvelle contrainte est apparue. Non seulement l'étendue granulaire doit être limitée, mais la granulométrie doit également être continue et bien distribuée. La quantité de sable doit donc être ajustée pour obtenir un compromis satisfaisant.

Cependant, l'absence de ségrégation dynamique lors d'un essai à la L-Box ne suffit pas à garantir l'homogénéité des propriétés finales du matériau. Une instabilité du matériau peut également s'opérer lors de la phase de repos précédant la prise, (ségrégation statique).

I.6.2.2- Ségrégation statique

Si on suppose que le matériau s'est correctement mis en place (absence de ségrégation dynamique) et que seule une ségrégation des gros granulats sous l'effet des forces de pesanteur peut apparaître.

La ségrégation statique est problématique car elle n'est pas décelable en surface (sauf si elle s'accompagne de ressuage). Il est donc nécessaire de l'appréhender en amont du coulage. Les essais permettant de mettre en évidence et de mesurer la ségrégation

statique sur béton frais seront tout d'abord présentés. Des études portant sur la compréhension des mécanismes du phénomène seront ensuite abordées. Nous verrons qu'elles restent limitées mais qu'elles ouvrent cependant quelques pistes de recherche.

Différents essais sont disponibles dont on présente ; Essai au tamis, Essai au cylindre, Essai à la colonne, Essai sur une colonne sans vibration, Essai à la bille, Essai à la palette.

I.6.2.2.1- Essai au tamis

L'essai au tamis complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné (boîte en *L*, en *U*, etc.) ou non (étalement) en caractérisant la stabilité et la résistance à la ségrégation. Proposé dans les recommandations provisoires de [AFGC, 2002], Figure I.26.



Figure I.26- Essai de stabilité au tamis

Mode opératoire de l'essai

Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression :

$$\pi = (P_{\text{laitance}} \times 100) / (P_{\text{échantillon}}) \quad (\text{I.27})$$

Le critère de stabilité de cet essai est:

1. $0 \leq \pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
2. $15 < \pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
3. $\pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise

Lorsque $0 \leq \pi \leq 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise [Cussigh et al, 2003]

I.6.2.2.2- Essai au cylindre

L'essai de ségrégation au cylindre a été proposé par [Van Bui et al.2002]. Il s'agit d'un appareillage assez simple, donc utilisable éventuellement sur chantier, Figure I.27.

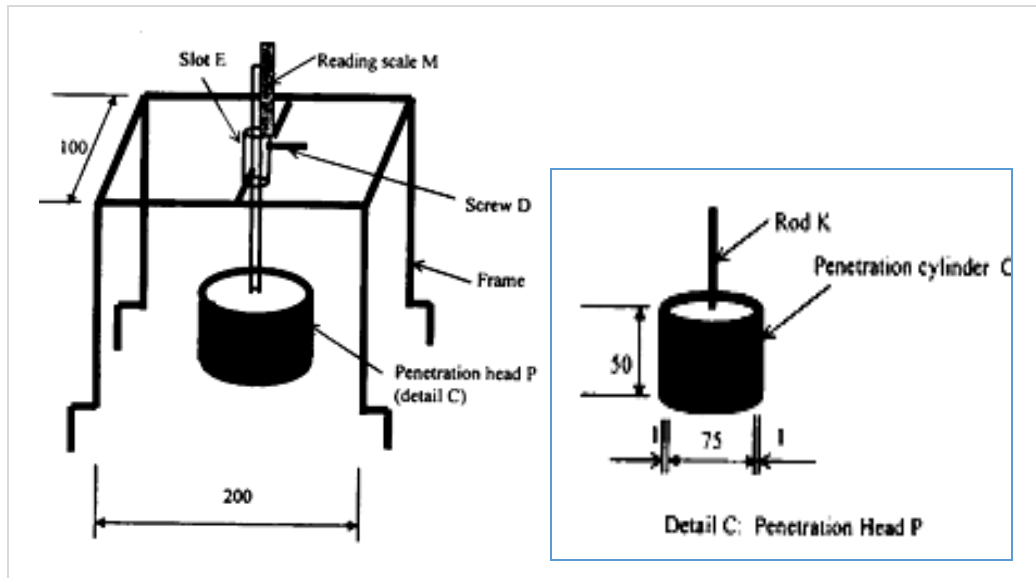


Figure I.27- Essai au cylindre, [Van Bui et al.2002].

L'essai consiste à placer un cylindre (en aluminium ou en plastique) sur la surface de l'échantillon de béton à tester et à le laisser pénétrer dans le matériau. Au bout de 45s la hauteur de pénétration (P_d) est mesurée. Cette manipulation est répétée sur deux côtés diamétralement opposés de l'échantillon.

Le critère de stabilité associé à cet essai est le suivant :

1. si $P_d \leq 8$ mm, alors le béton présente une bonne résistance à la ségrégation
2. si $P_d > 8$ mm, le béton offre une faible résistance à la ségrégation.

Cet essai, présente l'avantage d'être très simple à réaliser et les résultats sont obtenus directement. De plus, l'appareillage est peu cher et peu encombrant. Mais la surface d'essai doit être parfaitement plane. Par ailleurs, il n'y pas données prouvant le caractère répétable et reproductible de cet essai, ni de données concernant la précision de cet essai [RILEM.TC145].

[Sedran, 1999] soulevait la question de la représentativité du cylindre utilisé car il ne disposait pas de ses caractéristiques. Une publication récente de [Van Bui et al.2002] indique que le cylindre pèse 54 g. En prenant une masse volumique de 2700 kg/m³, on peut alors calculer le diamètre du granulat que représente le cylindre.

On obtient : $D \approx 15,7mm$. Cependant, on peut mettre en doute la représentativité de la forme du cylindre utilisé et de son état de surface vis-à-vis d'un granulat réel.

I.6.2.2.3- Essai à la colonne.

Cet essai a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley (en 2002) et par l'Université de Ghent (en 2001), Figure I.28.

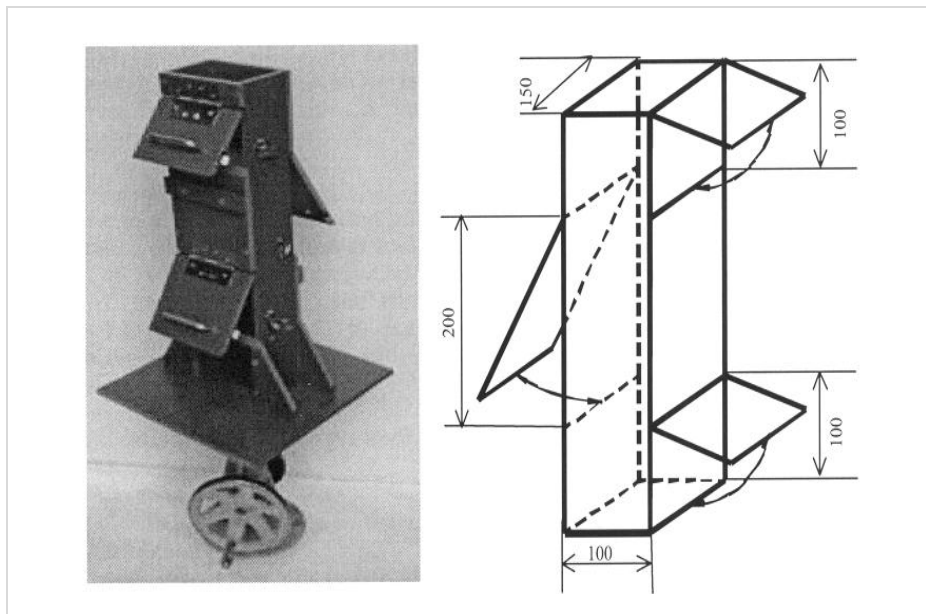


Figure I.28- Essai de stabilité à la colonne [RILEM.TC145]

Il s'agit de remplir la colonne présentée sur figure et de laisser le matériau au repos pendant 1 min. Après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses. Les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés. Chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés.

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

Si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation

Si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps. Il est plus adapté à des essais en laboratoire que sur chantier. Par ailleurs, la répétabilité s'amenuise à mesure que le risque de ségrégation augmente [RILEM.TC145]. On peut s'interroger sur le sens physique de cet essai et de sa pertinence dans le cas des BAP puisque la vibration accélère les phénomènes de ségrégation.

I.6.2.2.4- Essai sur une colonne sans vibration

[Lowke et al. 2003] ont proposé récemment un essai assez proche du principe de l'essai à la colonne décrit plus haut, mais sans vibration. Il s'agit de remplir un cylindre métallique, séparable en trois parties, avec un échantillon de 8l de béton. Après un temps de repos de 30 min (temps beaucoup plus long que celui de l'essai à la colonne), les échantillons provenant des trois parties du dispositif sont récupérés, et pesés. Ils sont ensuite lavés et passés au tamis pour ne conserver que les gravillons supérieurs à 8 mm. La répartition des gravillons 8/16 mm de chacune des parties est étudiée. Comme pour l'essai à la colonne, le principe est simple et assez instinctif mais nécessite un équipement spécifique (tamis et balance). De plus, d'après les auteurs, le temps nécessaire pour réaliser cet essai est de l'ordre de 60 min. Ce dispositif semble donc difficilement utilisable sur chantier sous sa forme actuelle.

I.6.2.2.5- Essai à la bille

Un essai proche de l'essai au cylindre a été développé au LCPC en collaboration avec l'Université de Sherbrooke par [Trudel, 1995] et repris par, [Sedran, 1999], Figure I.29.

Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une bille de même dimension que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton.

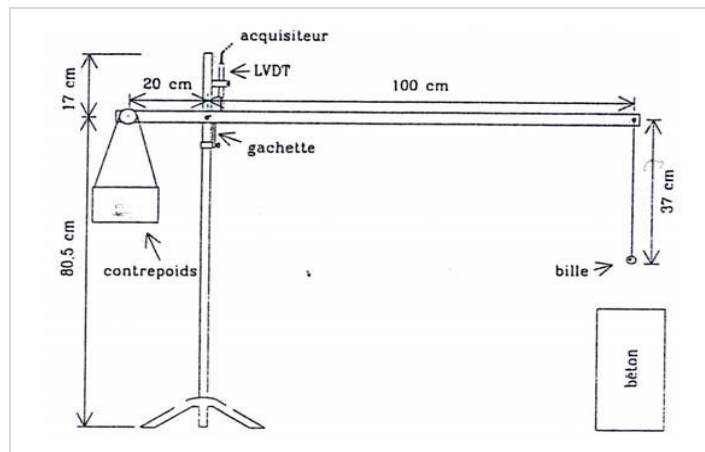


Figure I.29- Essai à la bille, [Trudel, 1995]

La densité apparente de la bille peut être ajustée grâce à un contre-poids et le déplacement de la bille est mesuré par un capteur LVDT relié à un ordinateur. Les résultats sont donc obtenus directement. Le positionnement de la bille avant l'essai est primordial. Trudel [Trudel, 1995] remarque que la bille devrait être positionnée avant le coulage du béton pour ne pas perturber l'arrangement du squelette granulaire, mais ceci ne semble pas possible avec son dispositif expérimental. Il fait donc le choix de positionner la bille par enfoncement sous la surface du béton. Par ailleurs, la densité de

la bille est plus élevée que celle des granulats afin d'accélérer le phénomène de ségrégation. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus sur éprouvettes durcies analysées par un logiciel de traitement d'image permettant de définir un indice de ségrégation. Une bonne corrélation est mise en évidence. Sedran [Sedran, 1999] considère cependant que les paramètres de l'essai doivent être ajustés car le choix d'une densité de bille élevée peut perturber les résultats.

I.6.2.2.6- Essai à la palette

Tangtermsirikul et al. [Tangtermsirikul et al. 1991] ont proposé un essai permettant de qualifier l'aptitude d'un mortier à résister au cisaillement d'un gravillon modèle, représenté dans cet essai par une palette métallique, Figure I.30.

Il s'agit de mesurer l'effort nécessaire pour extraire la palette d'un échantillon de mortier et de répéter la mesure à différentes vitesses. Les auteurs font en effet l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre la vitesse et la force d'extraction.

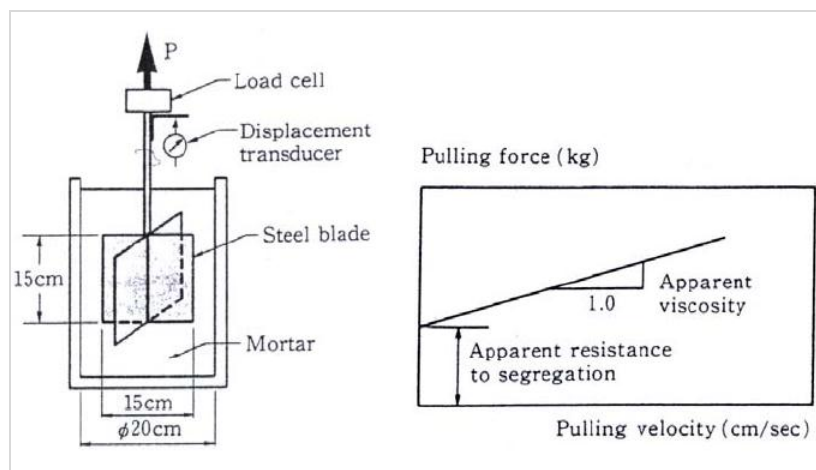


Figure I.30- Essai d'extraction d'une palette métallique [Tangtermsirikul et al, 1991]

En extrapolant les résultats pour une vitesse d'extraction nulle, ils définissent la force de résistance à la ségrégation. La pente de la droite obtenue correspond à la viscosité apparente du mortier. On peut se poser la question de la représentativité de la palette par rapport à un granulat.

Cet essai ne peut pas être utilisé sur chantier puisqu'il ne permet pas de tester des bétons et qu'un appareillage spécifique est nécessaire. Il présente cependant l'intérêt de fournir une mesure physique de la résistance à la ségrégation ce qui n'est pas le cas des autres essais.

I.6.2.2.6- Conclusion sur les essais disponibles

Le principal inconvénient des différents essais de stabilité statique est de ne pas être toujours répétables et parfois peu reproductibles [Cussigh, et al, 2003]. Le sens physique de certains essais peut également être mis en doute. Les différents essais réalisables sur éprouvettes de béton durci peuvent néanmoins servir de complément à un essai sur béton frais et peuvent éventuellement permettre de valider une approche [Sedran, 1999].

Ainsi, avant même de pouvoir imaginer un essai de réception du matériau frais sur chantier, il semble nécessaire de mettre en évidence et de comprendre les mécanismes élémentaires de la ségrégation dans les bétons.

Selon [deLarrard et al. 2000], les caractéristiques exigées à l'état frais pour les bétons auto-plaçant sont un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm, un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa, et une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa. Selon [Wallevik ,2003], le seuil exigé pour ces bétons doit être inférieur à 200 Pa. D'un point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600 mm. L'AFGC préconise aussi un étalement entre 650 et 800 mm (AFGC, 2000). Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton suffisamment fluide et qui ne présente pas de ségrégation.

Une observation visuelle permet aussi de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Éventuellement, une ségrégation apparaît sur le bord de la galette indiquant la présence de ressuage (film d'eau aux alentours de la galette). Ceci correspond à une longueur d'écoulement atteinte supérieure à 60 cm dans la boîte LCPC [Roussel, 2007 a] du fait de l'analogie entre l'essai au cône d'Abrams et la boîte.

I.7- Conclusion du chapitre

Pour les bétons, l'hydratation entre le ciment et l'eau qui est caractérisée par une réaction complexe, est à l'origine de l'évolution d'une microstructure hétérogène vue comme un milieu poreux évolutif composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux.

Le volume poreux, qui au départ correspond à la quantité d'eau libre présente au malaxage, va diminuer au fur et à mesure que l'hydratation progresse. Pour un milieu fermé (sans échange hydrique avec l'extérieur du matériau), un volume de vide, provoqué par la contraction des hydrates, apparaît dans ce réseau poreux engendrant une diminution de la saturation en eau et par conséquent de l'humidité relative. L'augmentation de ce volume de vide dans la porosité entraîne également une diminution de l'épaisseur de l'eau adsorbée à la surface des pores.

L'évolution de l'hydratation se traduit à l'échelle macroscopique par une évolution des propriétés mécaniques et des déformations endogènes.

Le BAP par rapport au béton ordinaire présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales,...etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fillers calcaires...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes de formulation et d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton.

Dans ce chapitre, en premier partie, il a été présenté une synthèse bibliographique documentée, passant en revue les différentes méthodes de formulation japonaises, et autres. Ces méthodes sont essentiellement basées sur l'optimisation du volume de pâte, des mortiers ou encore sur l'optimisation du squelette granulaire.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée aux différents essais et techniques de caractérisation des BAP, essentiellement à l'état frais, en mettant l'accent sur le travail qui a été fait au niveau européen ce qui a constitué le Guide Européen pour les BAP.

De la lecture de la bibliographie vienne cette recherche expérimentale sur les bétons en utilisant les matériaux locaux algériens. L'approche de formulation utilisée est basée sur les fondements de la méthode japonaise d'Okamura. Ainsi l'optimisation des formulations des BAP s'est effectuée à partir des résultats d'essais sur bétons. Plusieurs teneurs en fillers ont été envisagés.

Chapitre I Propriétés des bétons frais

Chapitre II Propagation d'ondes ultrasoniques dans les milieux hétérogènes du génie civil.

II.1- Introduction

Dans le cadre de ce travail, nous nous utilisons la méthode par ultrasons dont l'efficacité a été montrée dans plusieurs travaux [Fortin, 2005], [Eslami, 2010]. Ces études ont mis en évidence la sensibilité des ondes ultrasonores à la variation des propriétés mécaniques et géométriques des matériaux. En effet, les caractéristiques des ondes ultrasonores (notamment les vitesses de propagation et l'amplitude) subissent des modifications qui sont liées essentiellement à l'interaction de l'onde avec le matériau. Dès lors, plusieurs avantages se présentent et confèrent à ces méthodes une potentialité vis-à-vis de l'évaluation des propriétés et donc de la ségrégation du béton.

Les méthodes à ultrasons sont utilisées pour mesurer l'uniformité. De plus, les ondes à ultrasons peuvent être employées pour détecter des fissures et des cavités dans les structures.

La méthode d'auscultation par ultrasons la plus courante pour l'évaluation des structures en béton est la méthode par vitesse de pulsation. Elle a été utilisée avec succès autant en laboratoire que sur le chantier. Il est possible d'utiliser cette technique pour évaluer la qualité d'un béton ainsi que pour en faire l'analyse de sa détérioration. La détermination du module d'élasticité dynamique et du rapport de Poisson est l'utilisation la plus directe de ce système et la plus acceptable du côté théorique. De nombreux chercheurs ont publié des résultats sur ces deux propriétés [Naik et Malhotra, 1991]

La méthode par vitesse de pulsations peut également être très utile pour l'étude de l'homogénéité et de la qualité du béton. L'hétérogénéité dans le béton crée des dispersions de pulsations. Ces dispersions sont causées par des facteurs indirects tels que la source d'approvisionnement du béton, les ingrédients du mélange et les problèmes de consolidation (vibration) lors de la mise en place du béton en chantier. Il est possible de faire des comparaisons qualitatives de bétons in situ. D'autres applications sont couramment utilisées telles que : la vérification de la densité et la localisation d'alvéoles dans le béton. Dans un ouvrage de grande importance sur le développement de la technique par ultrasons, [McHenry et Oleson, 1967] citent dix cas types où la mesure des vitesses de pulsations est un supplément avantageux pour la détermination de procédures de réfections de barrages. [Elvery et Din, 1969] montrent qu'il est parfois avantageux d'utiliser les résultats dynamiques de la résistance à la compression, qui proviennent des vitesses de pulsations, plutôt que ceux des essais statiques de compression sur des échantillons de béton prélevés par carottage. Le but de ces études a porté sur la détermination de la résistance en flexion de poutres en

béton armé. Les auteurs mettent en évidence la possibilité, via la méthode à ultrasons, de clairement identifier à l'intérieur des poutres des régions de résistances inférieures et évaluent l'influence de ces zones sur le comportement en flexion des poutres.

Aujourd'hui, la majorité des avancées technologiques s'effectuent en laboratoire. [Lozev et col. 1996] présente une étude de la consolidation du béton à l'aide d'un interféromètre à pulsation d'ultrasons. Dans leur recherche, ils établissent une corrélation entre le niveau de consolidation du béton et la vitesse de propagation des ultrasons. Ils ont démontré l'influence importante des facteurs du processus de cure sur la vitesse de propagation des ondes. Ils terminent leur recherche en affirmant que leur méthode est efficace pour l'évaluation du niveau de consolidation pendant et après la période de cure.

[Selleck et al, 1998] étudient le phénomène des fissures distribuées à l'aide de la technique par ultrasons. Les faits saillants de leur étude sont la découverte que les ondes d'ultrasons sont peu susceptibles à la microfissuration du béton. Cependant, l'amplitude des signaux change considérablement. Un aspect important de cette recherche est l'utilisation d'un processus de gel dégel pour réaliser le niveau de microfissuration voulue. Malgré une diminution de la vitesse de propagation des ondes de compression au fur et à mesure que les cycles de gel dégel progressent, le taux de diminution est faible. Les auteurs de cette recherche indiquent qu'une diminution de 25 à 50 % du niveau de module d'élasticité dynamique correspond à une diminution de 3 à 9 % de la vitesse de propagation des ondes.

II.2- Généralités sur les ondes ultrasonores

Par définition les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kHz à plus de 100 MHz. La gamme de 0,1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques.

II.2.1- Principe

Le principe de base du contrôle ultrasonore consiste à envoyer une onde élastique par l'intermédiaire d'un transducteur dans le matériau à contrôler. Il existe en général, deux modes principaux d'utilisation des ultrasons, au contact et en immersion :

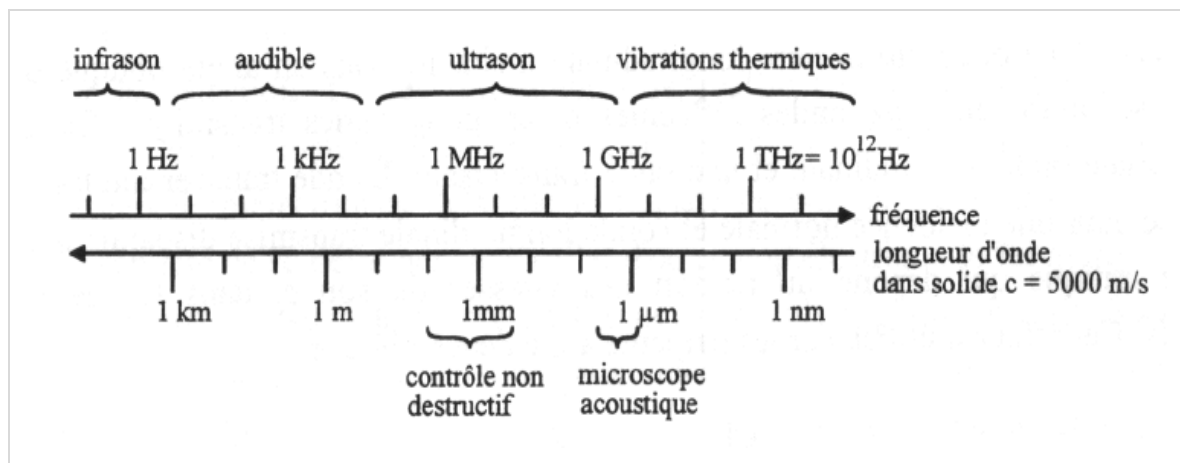


Figure II.1- Échelle des ondes élastiques [Jacques, 2012].

Contrôle par contact : Les transducteurs ultrasonores sont directement placés sur les faces de l'échantillon à contrôler, la bonne liaison acoustique est assurée par un agent de couplage qui est généralement l'air ou un fluide visqueux tel que l'eau, ainsi l'onde acoustique est générée et réceptionnée au contact direct de l'échantillon. L'épaisseur du couplant est de l'ordre du dixième de millimètre.

Contrôle par immersion : Les transducteurs sont situés à une certaine distance de la pièce. Le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Ces techniques sont largement mises en œuvre dans nombreuses applications parmi lesquelles on retiendra comme exemple la détermination de défauts microscopiques ou macroscopiques et la détermination des propriétés intrinsèques des matériaux [Lhermitte *et al.* Yehet *al.* 2003].

Les ondes ultrasonores, qui sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout le matériau ayant une certaine élasticité. Les techniques ultrasonores sont largement utilisées pour le contrôle des bétons ordinaires, mais aussi pour les bétons spéciaux comme auto-plaçant et le béton fibré à ultra haute performance [Bian, 2009].

Physiquement, les ondes longitudinales (onde P), transversales (onde S) et de Rayleigh sont les principaux types de propagation ultrasonore. Les modes de propagation P et S sont appelées ondes de volume. Elles se propagent dans tout le matériau et sont définies pour un milieu infini. En présence de conditions aux limites liées au caractère fini du milieu (présence d'interfaces), d'autres types d'ondes apparaissent. L'onde de Rayleigh, R, résulte d'interférences des ondes P et S, et apparaît dans un milieu semi infini au voisinage de la surface libre. Sa propagation est une combinaison de vibrations (déplacement des particules élémentaires) de compression et de cisaillement. Les vibrations de cisaillement sont plus importantes que celles de compression,

notamment au voisinage de la surface. Son amplitude est décroissante en fonction de profondeur d'investigation. L'onde de Rayleigh est plus lente que les ondes de volume P et S. De plus, les autres types d'ondes telles que les ondes de Lamb, de Love, de Stoneley et de Scholte sont également citées dans la littérature. Elles se distinguent par la nature de l'interface entre deux milieux différents.

Une mesure par ultrasons peut être exploitée, soit par la vitesse (célérité) de propagation, soit par l'atténuation de l'amplitude d'ondes. La mesure de vitesse est la plus couramment utilisée en laboratoire et sur site. Dans un milieu élastique infini, les ondes se propagent en deux modes P et S, donc ses vitesses (V_p , V_s) dépendent des propriétés mécaniques des matériaux. Il est possible de démontrer que ces vitesses dépendent du module d'élasticité E , du coefficient de Poisson ν , et de la densité ρ (masse volumique) (Éq. II.1).

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (\text{II-1})$$

Ces relations permettent de déduire les propriétés élastiques d'un matériau isotrope à partir des vitesses V_p et V_s :

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \nu = \frac{1}{2} \frac{1 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad (\text{II-2})$$

En réalité, la méthode de détermination de la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton est définie par les normes (EN 12504-4) et (ASTM C597). La vitesse ultrasonore peut être liée aux propriétés mécaniques du béton (ex. résistance à la compression) en utilisant des corrélations empiriques. Une procédure de la détermination de ces corrélations est décrite dans la norme [EN 13791, 2007]. Par contre, la mesure d'atténuation est essentiellement réalisée en laboratoire, qui permet aussi de caractériser les évolutions du béton, notamment lors de son jeune âge, ou en cas d'endommagement.

Les caractéristiques ultrasonores principales qui sont exploitées sont :

- **La vitesse** de propagation dans le milieu, qui est directement associée à la densité du matériau et ses propriétés élastiques.

$$V = L/T \text{ (en km/s ou m/s)} \quad (\text{II-3})$$

Où V ; est la vitesse d'impulsion longitudinale, L ; est la longueur du chemin, T ; est le temps pris par l'impulsion pour parcourir cette longueur.

- **L'atténuation** dans le matériau, qui est liée à la viscosité du matériau.

Le signal ultrasonique qui se propage dans un milieu s'atténue au cours de son trajet. Cette atténuation est due à des interactions entre l'onde et le milieu de propagation qui

provoque une diminution de l'amplitude de l'onde et une perte préférentielle de ses hautes fréquences. L'atténuation est quantifiée par un coefficient d'atténuation [Pierre, 2000]. Il existe deux types d'atténuation

- Dans le cas d'un milieu homogène parfaitement élastique, l'atténuation est apparente, sans perte d'énergie. Elle est liée à la divergence du faisceau ultrasonore. Elle est nulle dans le cas de l'onde plane et inversement proportionnelle à la distance par rapport à la source pour une onde sphérique.

- Dans un milieu non homogène ou non élastique, s'ajoute une perte d'énergie due aux interactions entre la microstructure du milieu et l'onde. Dans ce cas on distingue l'atténuation intrinsèque et extrinsèque. La première ne dépend ni de la géométrie, ni de la méthode et de la configuration de mesure mais plutôt de la nature du matériau. En effet ce type d'atténuation est causé par deux catégories de phénomènes [Marie, 2006, Pierre, 2000 et Cuxac, 1991] :

- L'absorption : Elle résulte de la conversion de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur. Ce type d'atténuation intrinsèque est lié à la viscosité du matériau contrôlé. La dissipation de l'énergie sous forme de chaleur est due d'une part à des pertes thermo-élastiques résultant du déphasage entre contrainte et déformation, et d'autre part au non linéarité entre la contrainte et le déplacement atomique. Certains défauts cristallins comme les dislocations peuvent contribuer à l'atténuation par absorption.

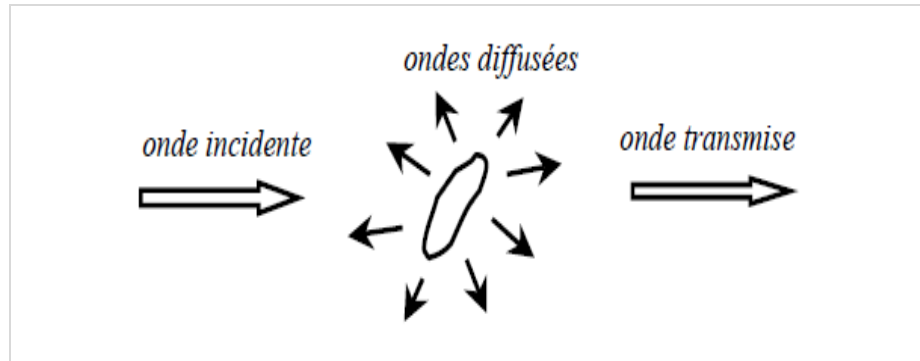


Figure II.2- Diffusion par une hétérogénéité (D'après [Marie, 2006] et [Cuxac, 1991]).

- La diffusion : Dans le cas de la diffusion (aussi appelée dispersion), une fraction de l'onde est déviée ou réfléchié lors de la rencontre de discontinuités de l'impédance acoustique. Ces hétérogénéités acoustiques peuvent être des pores, des précipités, des inclusions, des joints de grains, ou encore des défauts... Ici, une partie de l'énergie "quitte" le trajet rectiligne prévu par la théorie.

L'autre type d'atténuation dite extrinsèque est dû à la diffraction de l'onde sur les discontinuités ou obstacles dans le matériau (grains, pores, microfissures). Ce type d'atténuation peut être important lorsque la longueur d'onde devient comparable à la taille de l'hétérogénéité. Le calcul de l'atténuation est généralement réalisé à l'aide

d'une méthode dite rapport des spectres. En effet, l'amplitude spectrale d'un signal propagé dans le matériau décroît de manière exponentielle par rapport à la distance l :

$$A^{\text{ref}}(f) = A^0(f) G^r(l) e^{-\alpha^r(l) \cdot l} \quad (\text{II.4})$$

$$A(f) = A^0(f) G^r(l) e^{-\alpha(f) \cdot l} \quad (\text{II.5})$$

Dans les équations (IV.4) et (IV.5), $A^0(f)$, $A^{\text{ref}}(f)$ et $A(f)$ sont respectivement les amplitudes spectrales de l'onde émise et des ondes reçues sur les échantillons d'un milieu de référence et du milieu étudié. En plus $\alpha^r(f)$ et $\alpha(f)$ sont les coefficients d'atténuation de ces deux milieux qui dépendent de la fréquence f . Le facteur géométrique $G(f, l)$ présente la réflexion, réfraction et diffraction. Ainsi, le rapport des spectres s'écrit comme suivant :

$$\text{Ln}(A^r/A) = \text{ln}(G^r/G) + (\alpha(f) - \alpha^r(f)) \cdot l ; \quad (\text{II.6})$$

Considérons la même géométrie de deux échantillons du milieu de référence et du milieu étudié : le rapport G^r/G indépendant de la fréquence est égal à 1 et donc le premier terme à droite de l'équation (IV.7) est égal à zéro. D'ailleurs, au laboratoire, l'aluminium est souvent choisi comme le milieu de référence due au fait que son coefficient d'atténuation est très faible $\alpha^r \approx 0$. Nous avons ainsi :

$$\alpha(f) = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{A^r}{A}\right) \quad (\text{II.7})$$

Généralement le coefficient d'atténuation dépende linéairement de la fréquence f . Ainsi ce coefficient peut être déterminé à partir de la pente de la courbe représentant le rapport des spectres $\text{ln}(A^r/A) / l$.

Le coefficient d'atténuation peut être évalué en (Np/m) ou (dB/m) grâce à la relation suivante

$$\alpha [dB / m] = 8.686 [Np / m] \quad (\text{II.8})$$

L'atténuation des ondes peut également être caractérisée par un paramètre dit facteur de qualité Q qui est inversement proportionnel avec le coefficient d'atténuation :

$$Q = \frac{\pi \cdot f}{v \cdot \alpha} \quad (\text{IV.9})$$

Concernant la fiabilité d'évaluation des propriétés du béton, il est nécessaire de préciser des problèmes rencontrés de quatre ordres : la mise en œuvre, l'étalonnage de la mesure, l'interprétation des données, l'exploitation des résultats [Garnier 2005].

Lors de la mise en œuvre, la vitesse mesurée peut être affectée par plusieurs facteurs tels que le gel couplant influençant la répétabilité des mesures, le type de transducteur, la présence d'armatures, les conditions de mesures (ex. humidité, température), les conditions latérales du milieu traversé, etc. [Garnier 2012].

II.3- Equipement pour test de vitesse d'impulsion

L'équipement consiste essentiellement en un générateur d'impulsions électriques, une paire de transducteurs, un amplificateur et un dispositif électronique de chronométrage pour mesurer l'intervalle de temps entre les initiations d'une impulsion générée au niveau du transducteur d'émission et son arrivée à la transducteur récepteur.

Deux formes d'appareils électroniques de chronométrage et d'affichage sont disponibles, dont l'une utilise un tube à rayons cathodiques sur lequel l'impulsion reçue est affichée par rapport à un temps approprié échelle, l'autre utilise une minuterie d'intervalle avec un dis numérique lecture directe

L'équipement doit avoir les caractéristiques suivantes. Il devrait être capable de mesurer le temps de transit sur des distances allant d'environ 100 mm au maximum épaisseur à inspecter avec une précision de $\pm 1\%$. En général, les transducteurs utilisés doivent être la gamme de 20 à 150 kHz bien que des fréquences aussi basses que 10 kHz puissent être utilisées très longtemps longueurs de trajets en béton et jusqu'à 1 MHz pour les mortiers et les coulis ou pour les courtes distances.

Les impulsions à haute fréquence ont un début bien défini mais, lorsqu'elles traversent le béton, s'atténuent plus rapidement que les impulsions de fréquence inférieure. Il est donc préférable d'utiliser des transducteurs à haute fréquence pour les courtes distances et des transducteurs à basse fréquence longueurs de trajet. Les transducteurs d'une fréquence de 50 kHz à 60 kHz conviennent à la plupart des applications.

IV.4- Forme et taille de l'échantillon

La vitesse des courtes impulsions de vibration est indépendante de la taille et de la forme du spécimen dans lequel ils voyagent, à moins que sa moindre dimension latérale soit inférieure à la valeur minimum. En dessous de cette valeur, la vitesse d'impulsion peut être réduite de manière appréciable. L'ampleur de cette réduction dépend principalement du rapport de la longueur d'onde des vibrations d'impulsion à la dimension latérale la plus petite de l'échantillon mais elle est insignifiante si le rapport est inférieur à l'unité.

Le tableau II.1 donne la relation entre la vitesse d'impulsion dans le béton, le transducteur fréquence et la dimension latérale minimale admissible de l'éprouvette.

II.5- Utilisation de transducteurs

L'utilisation de transducteurs permet de contrôler la forme et la durée de l'impulsion afin d'avoir une source répétitive et très énergétique. Les transducteurs sont constitués d'une pastille piézo-électrique, qui peut se déformer sous la sollicitation d'un courant électrique ou bien générer un courant électrique sous l'effet d'une déformation. Ils

peuvent donc être utilisés à la fois en émission et en réception et nécessitent d'être en contact avec le matériau à ausculter.

Table II.1- Effect of specimen dimension on pulse transmission
[Ould-Naffa et al. 2002]

Transducer frequency	Pulse velocity in concrete (km/s)		
	v_c	v_c	v_c
	Minimum permissible lateral specimen dimension		
KHz	mm	mm	mm
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Ces transducteurs peuvent être résonnants à une fréquence donnée, ou large bande autour d'une fréquence centrale, mais la largeur de bande utile n'est jamais très étendue (quelques centaines de kHz). Ils émettent généralement des ondes de compression, mais certains peuvent émettre des ondes de cisaillement [Ould-Naffa et al. 2002]. L'utilisation de sabot fixe au transducteur permet de favoriser la génération d'ondes de Rayleigh à la surface du béton [Piwakowski et al. 2004]. Les transducteurs sont les moyens de génération et de détection les plus couramment utilisés pour le contrôle non destructif des matériaux.

Les inconvénients majeurs des transducteurs sont leurs dimensions parfois importantes, allant jusqu'à plusieurs centimètres de diamètre. On ne peut pas déterminer avec précision un point d'émission équivalent ou un point de réception comme c'est le cas avec une source ou un récepteur ponctuel. Un couplant (gel, graisse, colle) doit également être utilisé pour assurer un bon couplage entre le transducteur et le matériau à ausculter, ce qui peut dégrader la répétabilité des mesures, et allonger le temps de mise en place de la mesure.

IV.6- Auscultation sonore

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages [Malhotra et Carino, 1991]. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises (NF-EN-12504-4, 2005) et Américaines (ASTM-C597-02, 2003), et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures. Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton en transmission, en réflexion, ou à la

surface. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur.

Cette méthode permet principalement de détecter entre autres choses un non uniformité des propriétés de la structure, des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de "nids de cailloux". Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations II.1 et II.2 [Zhou et al. 1995 ; Qixian et Bungey, 1996 et Wu et al. 1995].

Cependant, la vitesse mesurée dépend également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par tests quasi-statiques de compression en laboratoire [Popovics, 1996], et l'emploi de cette méthode pour déterminer les valeurs E et ν en grande déformation est déconseillée par la norme [ASTM-C597-02, 2003].

II.7- Les différents types des ondes ultrasonores

Une onde, représente la propagation des perturbations d'un milieu par rapport à sa position d'équilibre. Dans le cas des ondes mécaniques, la perturbation est un déplacement d'une particule du milieu. Selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire.

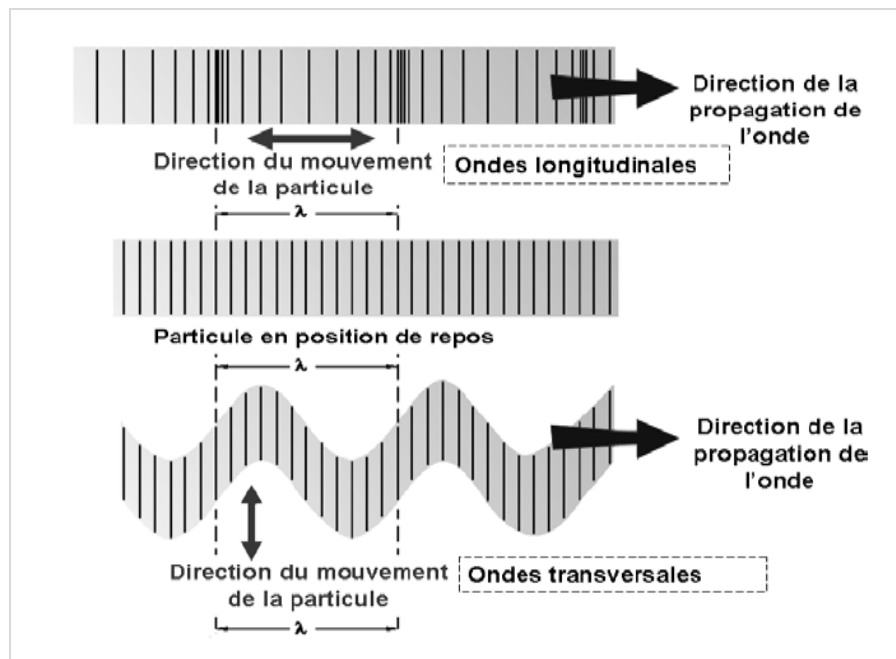


Figure II.3- Propagation et polarisation des ondes longitudinales et transversales (D'après [Marie 2006]).

II.7.1- Vibrations longitudinales

La direction de déplacement des particules est appelée polarisation, et lorsque l'on peut mettre en évidence, au moins localement, une direction de propagation, ces ondes prennent le nom d'ondes longitudinales. Leur polarisation est en effet parallèle à la direction de propagation [Jean, 2012 et Cuxac, 1991].

Les vibrations longitudinales sont produites quand la direction de vibration est parallèle à l'axe longitudinal de l'éprouvette. Pour cela les transducteurs doivent être placés selon le schéma de la figure IV.5. Pour un prisme le mode fondamental d'oscillation implique un nœud au milieu et des ventres aux extrémités. Il en résulte :

$$\lambda = 2L$$

ou :

λ : La longueur d'onde

L : Longueur de l'éprouvette étudiée.

Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de l'oscillation fondamentale, mais seuls les harmoniques impairs correspondent à un nœud au milieu de l'éprouvette.

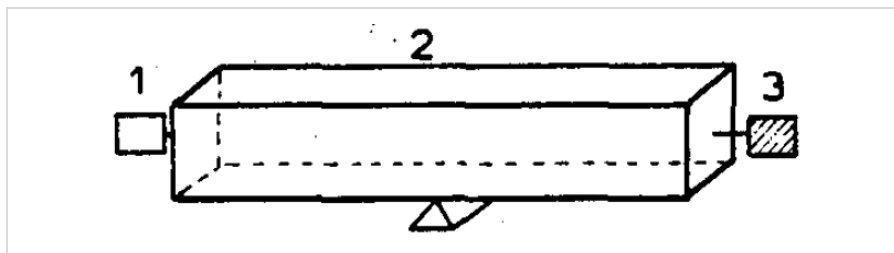


Figure II.4- Emplacement des transducteurs dans l'éprouvette

II.7.2- Autres types d'Ondes.

L'onde plane est définie, dans un milieu sans atténuation acoustique, par le déplacement (ou élongation) de chaque particule par rapport à sa position moyenne x (qui est aussi sa position d'équilibre dans le milieu de propagation en l'absence d'excitation acoustique) à l'instant t :

$$\vec{u} = \vec{U} \cos \omega \left(t - \frac{x}{V} \right) \quad (\text{II.10})$$

Avec U ; amplitude des élongations, V ; vitesse de propagation de l'onde acoustique de pulsation, $\omega = 2\pi f$ et f , la fréquence des ultrasons.

L'équation (II.10) est associée à une onde acoustique progressive, se déplaçant vers les x positifs. La longueur d'onde λ des ultrasons est donnée par :

$$\lambda = V/f = VT \quad (\text{II.11})$$

Avec T ; période des ultrasons. Le vecteur d'onde k a pour amplitude $2\pi/\lambda$.

Sous l'influence de l'onde acoustique, deux situations peuvent se produire (figure II.5) :

1^{er}, \vec{U} est parallèle à x : on a affaire à des ondes acoustiques longitudinales ;

Le champ de déplacement peut être décrit par, bedford et drumheller.

$$U_1 = U_1(x_1, t) \quad U_2 = 0 \quad U_3 = 0$$

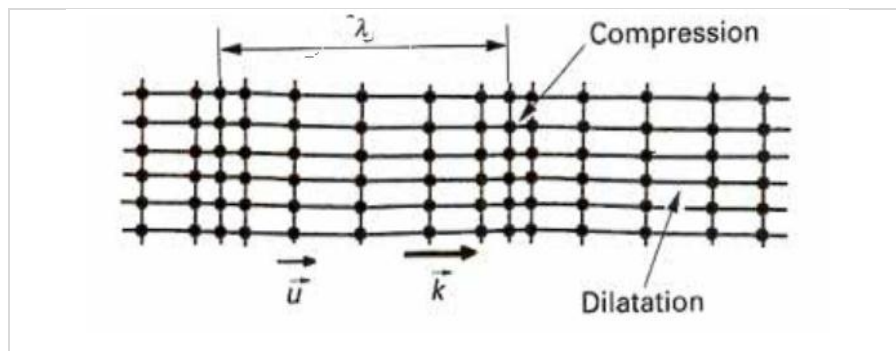


Figure II.5 - Propagation Longitudinale d'une onde acoustique

Pour cette onde plane longitudinale se propageant suivant x . Le déplacement est donné par l'équation (IV.10). La vitesse v des particules par l'équation (II.12)

$$v = -U\omega \sin \omega(t - \frac{x}{v}) \quad (II.12)$$

2^{eme} : \vec{U} est perpendiculaire à la direction x de propagation : c'est le cas des ondes acoustiques transverses (ou de cisaillement).

$$U_1 = 0 \quad U_2 = 0 \quad U_3 = U_3(x_3, t)$$

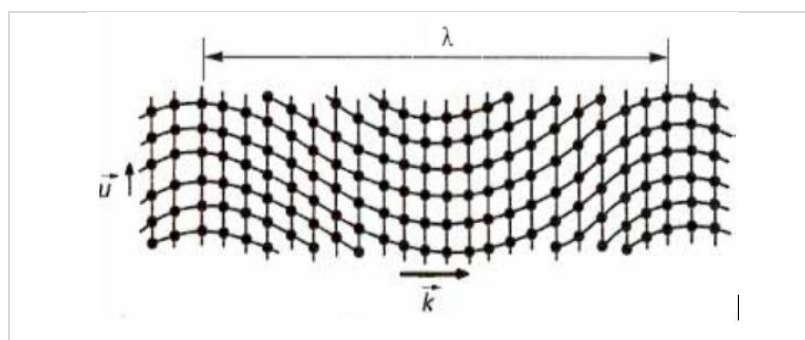


Figure II.6- Propagation transverse d'une onde acoustique

À chaque type d'onde acoustique, longitudinale ou transverses, est associée dans un milieu donné une vitesse longitudinale V_L ou transverse V_T . En général;

$$V_L \approx 2V_T.$$

Les ondes transverses ne peuvent se propager que dans les solides, les fluides (liquide ou gaz) ne constituant pas un support matériel pour ce type de vibrations, à l'exception toutefois des liquides extrêmement visqueux où les ondes transverses arrivent à se propager malgré une forte atténuation.

II.8- Sensibilité des ondes de volume à la granulométrie et la composition des bétons.

II.8.1- Influence du rapport E/C

La porosité des pâtes de ciment dépend directement du rapport E/C utilisé dans la formulation. La dimension des pores est en général beaucoup plus petite que dans le cas d'une porosité artificielle (10^{-3} - $10^3 \mu\text{m}$), et la porosité peut varier de 11% à 18%. A hautes fréquences ($>1,5\text{MHz}$), sur des blocs de ciment ou de mortier dont le rapport E/C varie de 0,45 à 0,65, des mesures en ondes de compression montrent que le rapport E/C influence fortement sur le facteur d'amortissement [Vergara et al. 2001]. Par contre, des mesures similaires à plus basses fréquences (inférieures à 800 kHz) montrent que les variations du facteur d'amortissement en fonction du rapport E/C sont plus faibles [Philippidis et Aggelis, 2005]. Quelle que soit la fréquence considérée, les mesures de vitesses des ondes de compression montrent une très forte sensibilité avec le rapport E/C .

Des études similaires ont été réalisées sur du béton contenant cette fois des granulats de taille importante ($D_{\text{max}} = 37,5\text{mm}$) [Philippidis et Aggelis, 2003, 2005] dans la bande de fréquences 20-800 kHz. Les résultats sont globalement comparables à ceux obtenus sur du ciment ou du mortier, mais du fait du plus grand degré d'hétérogénéité, les allures des courbes de vitesse ou d'amortissement avec la fréquence présentent de brusques variations rendant plus difficile la comparaison des résultats que dans le cas du mortier.

Que ce soit sur du ciment, du mortier ou du béton, des variations du rapport E/C influent fortement sur les valeurs de vitesse. Les variations du facteur d'amortissement sont importantes pour les plus hautes fréquences, mais sont relativement faibles en dessous de 1MHz, la précision de l'estimation de ces facteurs d'amortissement doit donc être très grande, ce qui est rendu d'autant plus difficile par la présence des granulats.

II.8.2- Influence du taux de saturation

La teneur en eau du béton représente le taux volumique d'eau libre dans le matériau, elle peut être comprise entre environ 4 et 14%. On peut également l'exprimer en termes de taux de saturation du béton, compris alors entre 0 (matériau complètement "sec") et 100% (complètement saturé), bien que ces valeurs extrêmes ne soient jamais atteintes

en pratique. Ce taux de saturation influe sur la vitesse de propagation des ondes mécaniques dans le béton [Ohdaira et Masuyama, 2000] ainsi que dans des roches [Bourbié et al. 1986]. Les études sur les effets du taux de saturation sur différents bétons [Villain et al. 2008 ; Piwakowski et al. 2008]. Ont montré que la variation de vitesses de phase avec la teneur en eau est importante et ne varie pas linéairement avec le taux de saturation.

II.8.3- Influence des inclusions rocheuses (sables et granulats)

Les effets de l'absorption et de la diffusion par les sables sur l'amortissement des ondes de Rayleigh (200-1200 kHz) dans du mortier, ont été quantifiés par [Jacobs et Owino, 2000]. Leur conclusion est que dans le mortier, les pertes par diffraction sur les grains de sable ($D = 1 \div 3 \text{ mm}$) sont négligeables par rapport à l'amortissement intrinsèque, l'amortissement mesuré étant principalement linéaire avec la fréquence. [Chaix, 2003] étudie dans sa thèse l'influence du taux de sable et des dimensions des grains dans du ciment (D variant de 1 à 8 mm), dans la bande fréquentielle 250-1250 kHz. L'ajout de sable dans le ciment provoque une augmentation des valeurs de vitesse et d'atténuation mesurées pour les ondes P. Entre les mortiers contenant différents taux et différentes dimensions de grains de sable, les différences ne sont visibles sur l'atténuation que pour les fréquences les plus élevées ($> 800 \div 1000 \text{ kHz}$). Les valeurs de vitesses sont très sensibles au taux d'inclusions pour toutes les fréquences, mais assez peu aux dimensions des inclusions.

Dans le cas de granulats de dimensions plus importantes, l'évaluation de l'atténuation devient plus délicate dans la même bande fréquentielle. En particulier, [Landis et Shah, 1995], présentent des courbes d'atténuation des ondes P pour une pâte de ciment (sans inclusions), du mortier "fin" ($D_{\max} = 1 \text{ mm}$), du mortier "grossier" ($D_{\max} = 5 \text{ mm}$) et du béton ($D_{\max} = 10 \text{ mm}$). L'allure de la courbe d'atténuation semble relativement uniforme avec la fréquence jusqu'à une fréquence limite qui diminue à mesure que D_{\max} augmente (Fig. II.7). Au-delà de cette fréquence limite, l'atténuation présente un saut important et a un comportement fréquentiel erratique : la dimension des hétérogénéités devient comparable à la longueur d'onde et les effets de la diffusion multiple deviennent alors très importants, le comportement des courbes d'amortissement reflète le caractère aléatoire de la configuration d'hétérogénéités rencontrée au cours de la propagation.

Dans le cas de bétons ayant des granulats plus gros ($D_{\max} = 37,5 \text{ mm}$) la différence d'atténuation des ondes P avec le mortier ($D_{\max} = 4,75 \text{ mm}$) est relativement faible pour des fréquences inférieures à 100 kHz et augmente progressivement avec la fréquence [Philippidis et Aggelis, 2005]. Cet écart est d'autant plus important et survient d'autant plus à basse fréquence que le rapport E/C est élevé. Ces effets sont attribués à l'existence d'une zone interfaciale entre les granulats et la pâte de ciment [Otsuki et

al. 2000]. La vitesse de phase mesurée sur le béton est plus élevée que celle mesurée sur le mortier quelle que soit la fréquence considérée

De part, sa structure très complexe, l'étude du béton en utilisant la propagation des ondes mécaniques est très délicate.

Un grand nombre de facteurs (hétérogénéités à différentes échelles, teneur en eau, formulation, température, etc.) peut influencer sur la propagation, le plus souvent de manière combinée. Les résultats de mesure sont donc difficiles à interpréter, notamment lorsqu'il s'agit d'isoler l'influence d'un seul de ces effets.

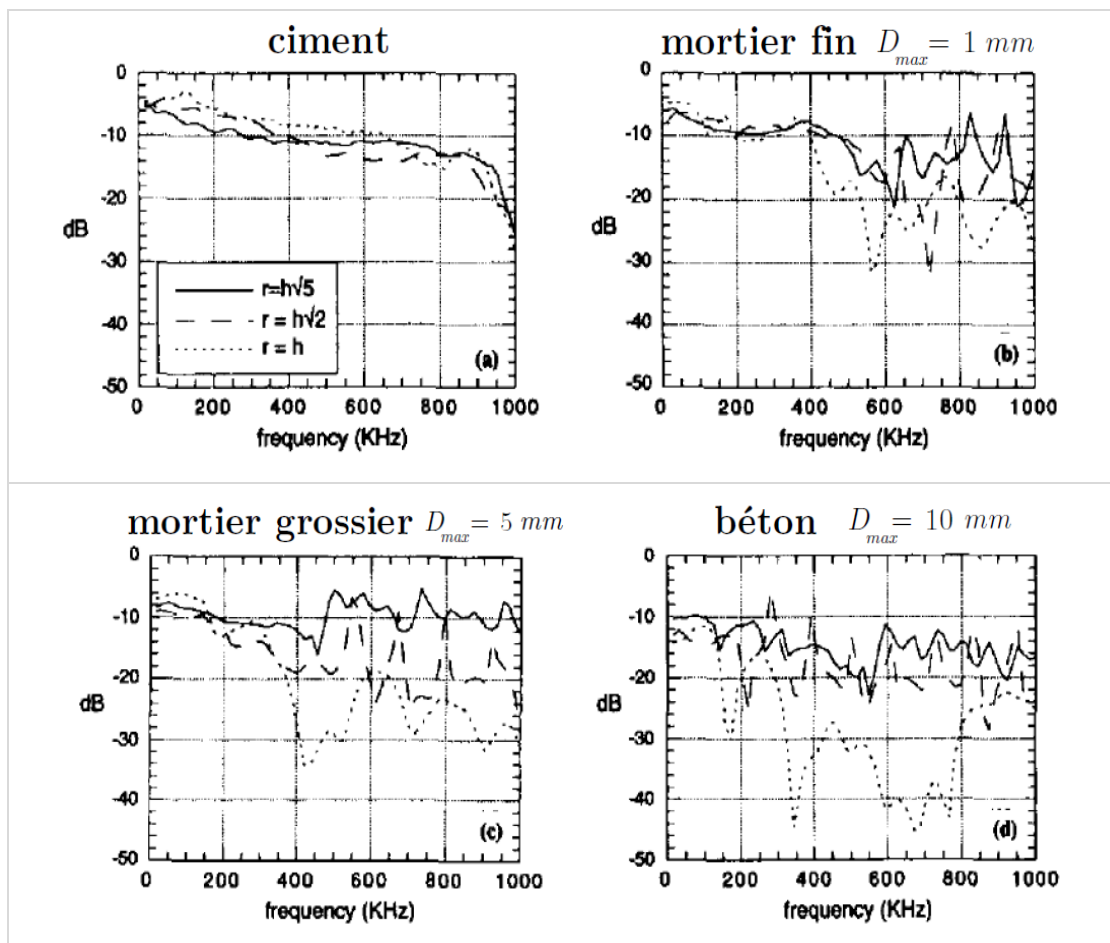


Figure II.7- Variations de l'atténuation des ondes P pour différents D_{max} , prises à différents endroits des spécimens, d'après [Landis et Shah, 1995].

Une bonne interprétation des résultats de mesures sur du béton va donc passer par l'emploi de méthodes de mesures expérimentales et de traitement de données permettant une évaluation des paramètres de propagation (vitesse de phase et amortissement), avec une précision suffisante pour pouvoir détecter de faibles variations de propriétés du béton. D'autre part, l'emploi d'une modélisation analytique peut permettre de réaliser une étude de sensibilité des mesures et d'aider à l'interprétation des résultats.

II.9- Conclusion

Dans ce chapitre il a été présenté, la propagation en milieu hétérogène du point de vue théorique. L'étude de la propagation dans de tels milieux passe par l'évaluation d'un champ moyen appelé champ cohérent, obtenu après moyenne sur un très grand nombre de réalisations du désordre. Ce champ cohérent décrit, sous certaines conditions, la propagation dans un milieu homogène effectif. Ce milieu homogène effectif possède un nombre d'onde complexe dépendant de la fréquence ; il est dispersif et atténuant.

L'étude bibliographique montre que la méthode des ultrasons peut être utilisée comme un outil efficace pour la caractérisation de la ségrégation. En combinant cette méthode avec les essais classiques de caractérisation il serait possible de pouvoir suivre la variation des propriétés et de répondre aux questions concernant les mécanismes responsables du changement microstructural du béton.

Chapitre **II** Propagation d'ondes ultrasoniques dans
les milieux hétérogènes du génie civil.

L'approche expérimentale s'articule sur des essais comparatifs de la caractérisation de la ségrégation pour différentes compositions de béton. Cette comparaison concerne deux techniques standards (tamis et colonne) par rapport à un essai non destructif par le biais d'impulsions ultrasoniques. Les essais ont été réalisés sur des mélanges conçus pour avoir différents niveaux de résistance à la ségrégation. Des corrélations ont été effectuées en fonction de divers indices de ségrégation pour évaluer la fiabilité de cette méthode non destructive quant à la caractérisation de la ségrégation des bétons par rapport aux méthodes traditionnelles.

III.1- Procédure expérimentale

Le programme expérimental mis au point concerne donc des essais de stabilité au tamis, tels que décrits par les recommandations européennes pour les BAP [EFNARC, 2005] et la norme [EN 12350-11, 2010], des essais de stabilité à la colonne [Cussigh et al 2003, BS 1881, Sonebi 2005 et Rooney et al 2001], et des essais ultrasoniques pour la caractérisation non destructive de la ségrégation.

Auparavant, on a procédé à la caractérisation de la fluidité des différents par le biais des essais d'étalement.

III.1.1- Essais de stabilité au tamis

Ces essais ont été réalisés conformément à la norme européenne pour la résistance à la ségrégation [EN 12350-11, 2010]. Le test vise à étudier la résistance du mélange de béton à la ségrégation en permettant à un échantillon de béton de 10l de subir une possible ségrégation statique pendant 15 minutes (dans un seau). Une éventuelle observation et notation de la présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau est faite, (fig. III.1.a). Ensuite, la couche supérieure de l'échantillon (4,8 kg \pm 0,2) est versée sur un tamis de 5mm. Le mortier traverse ensuite le tamis. Un indice π (pourcentage massique de l'échantillon passant au travers du tamis) est déterminé à l'aide de l'équation (III.1) et exprimé en% au 1% près [AFGC, 2000].

Une plus grande partie du mortier traversant le tamis caractérise une plus grande proportion à la ségrégation (fig. III.1.b).

$$\pi = \frac{M_{cs}}{M_c} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Où M_{cs} : masse de mortier recueillie à travers la taille d'ouverture du tamis de 5 mm
 M_c : masse initiale de la couche supérieure



Figure III.1.a- Essai au tamis et critère de stabilité (ressuage à la surface)

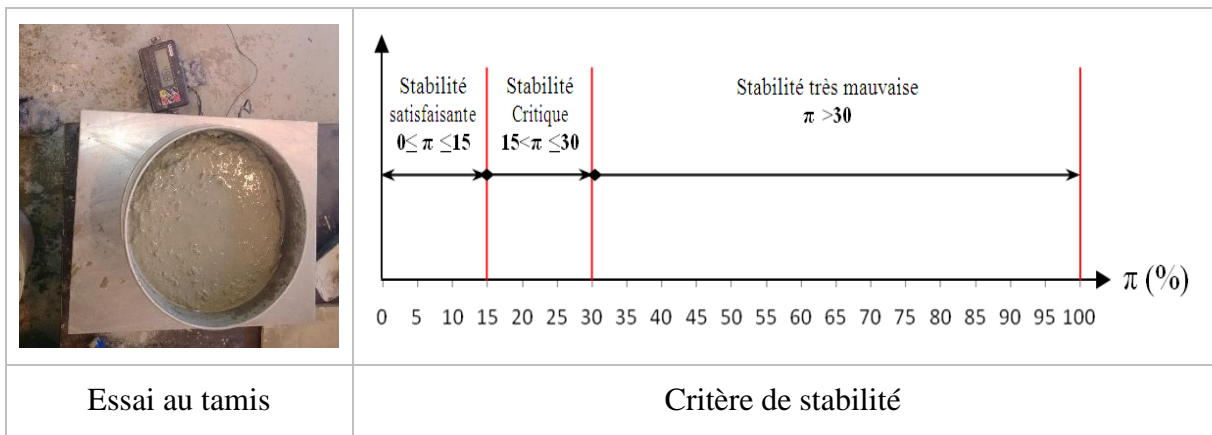


Figure III.1.b- Critère de stabilité de l'essai au tamis

III.1.2- Essais de stabilité à la colonne

Dans cet essai, le béton frais est placé dans un tube (section = 100 x 100 mm, hauteur = 500 mm), séparable en trois parties. Après 60 minutes (un temps plus long que celui de l'essai à la colonne qui a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley [RILEM.TC145], le béton est extrait de la partie supérieure (A=100x100x100 mm) et de la partie inférieure (B

=100x100x100 mm) du tube. Après avoir été lavés à travers un tamis, les échantillons sont analysés pour déterminer la proportion de gros granulats de chacune des parties (fig.III.2.a).

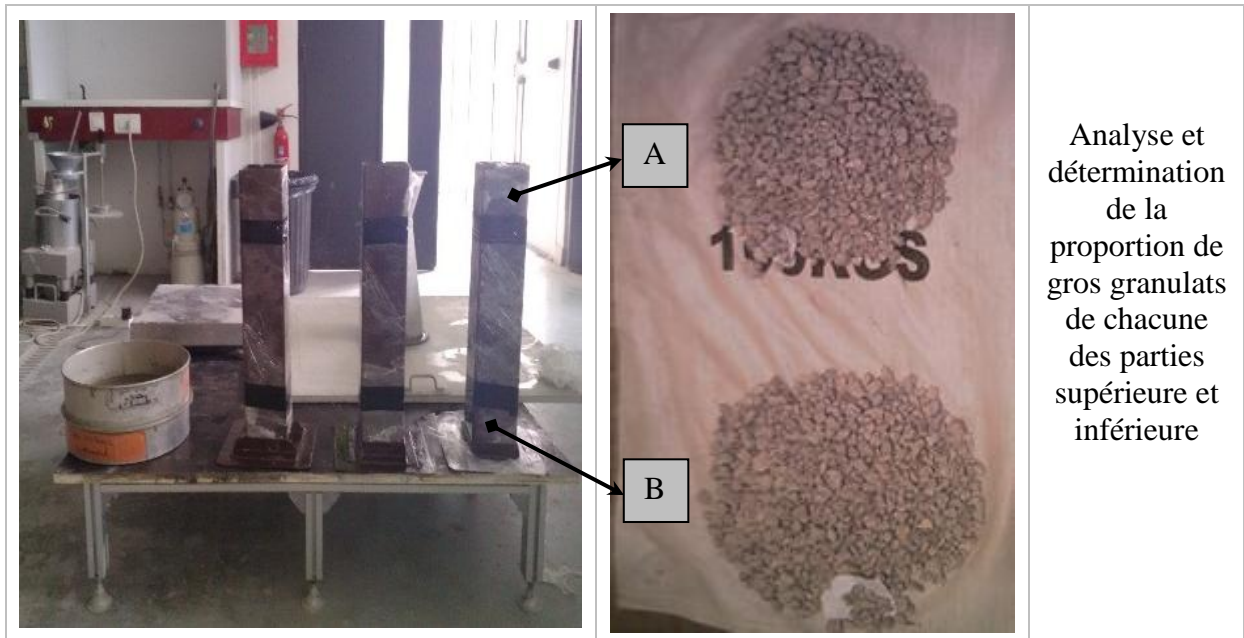


Figure III.2.a- Dispositif de l'essai à la colonne

La taille minimale des granulats analysés est supérieure à 5 mm. Un indice f est déterminé selon l'équation (III.2) avec une précision de $\pm 1\%$ (fig. III.2.b).

$$f = \frac{M_a^A}{M_a^B} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Où M_a^A : masse des gros granulats dans la partie supérieure (retenue sur la taille d'ouverture du tamis de 5 mm).

M_a^B : masse de gros granulats dans la partie inférieure (retenue sur la taille d'ouverture du tamis de 5 mm).

III.1.3- Essais ultrasoniques

Sur la base de la technique précédente de caractérisation de la ségrégation par des essais de stabilité à la colonne [BS 1881 : Part 203], on a procédé à la détermination d'un indice de ségrégation ultrasonore f_u . Cet indice qui est le coefficient ultrasonique de résistance à la ségrégation proposé est donné par l'équation (III.3) avec une précision de $\pm 1\%$ (fig. III.3 a et b).

$$f_u = \frac{V_A}{V_B} \times 100 \quad (III.3)$$

Où : V_A : la vitesse de propagation dans la partie supérieure [A]

V_B : la vitesse de propagation dans la section inférieure [B]

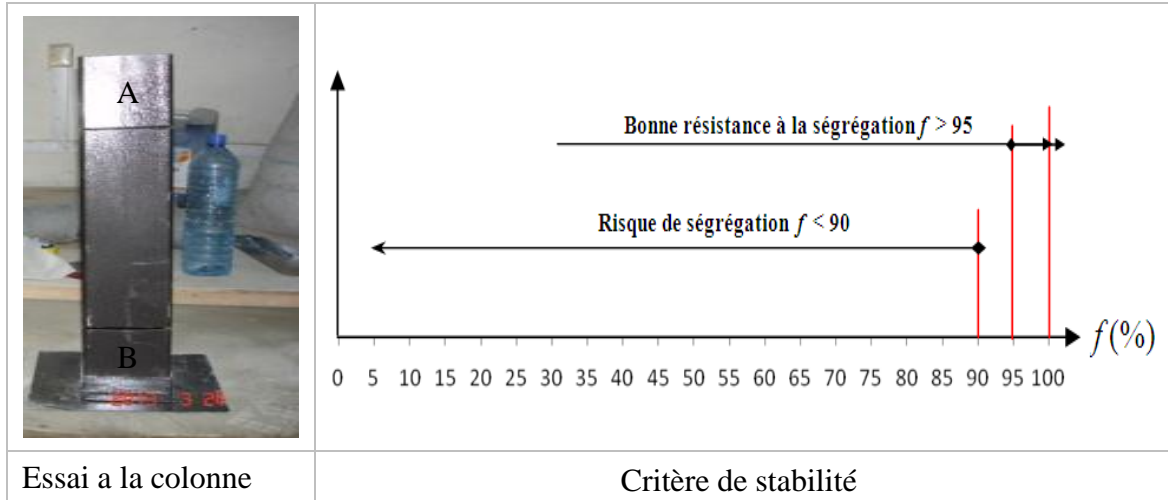


Figure III.2.b- Critère de stabilité de l'essai à la colonne

La vitesse d'impulsion est connue pour être affectée de manière significative par le type et la quantité des granulats [Bullock et Whitehurst 1959, Jones 1962 et Popovics et al 1990].

En général, la vitesse d'impulsion de la pâte de ciment est inférieure à celle du granulats. Selon plusieurs études [Bullock et Whitehurst 1959, Kaplan 1959 et Jones 1962], à un même niveau de résistance, le béton avec des teneurs en granulats plus élevées donne des vitesses d'impulsion plus élevées.

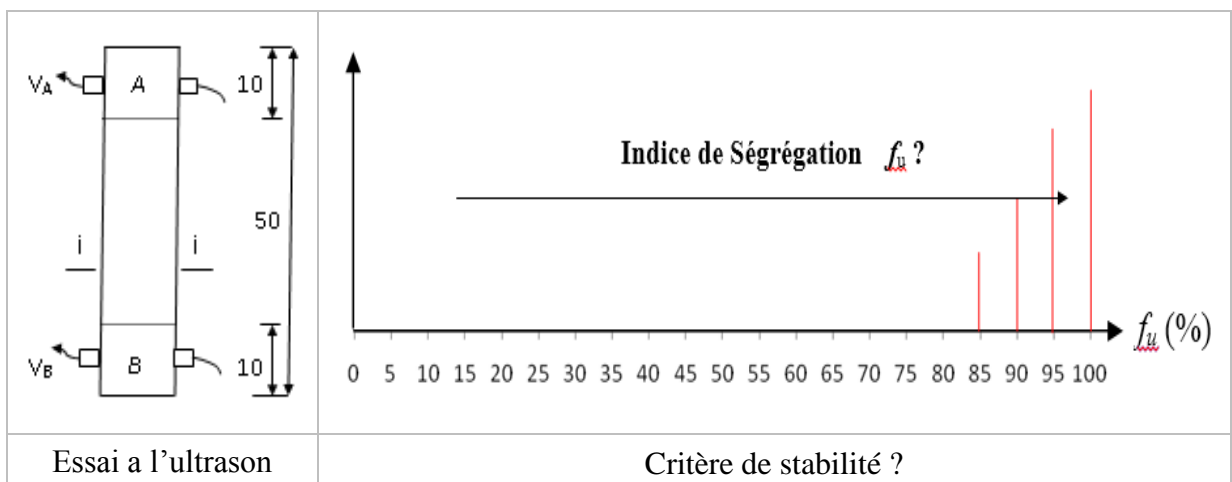


Figure III.3.a- Essais ultrasoniques et critère ultrasonique de stabilité



Figure III.3.b- Dispositif utilisé pour la caractérisation ultrasonique de la ségrégation (LGCH, université de Guelma, Algérie)

Les essais ultrasoniques ont été réalisés en mode direct pour déterminer les vitesses des ondes ultrasonores longitudinales. Ces essais ont été réalisés à l'aide d'un appareil ultrasonique de marque 'Controls' modèle 58 E0049/A, avec une fréquence des impulsions de 54 kHz (fig. III.4).

Les procédures d'essais ont été réalisées selon la norme ISO1920-7 [ISO, 2004].

Le principe de l'essai est que l'impulsion des vibrations longitudinales est produite par un transducteur électro-acoustique (émetteur). Après avoir traversé une longueur de trajet connue dans le béton, les vibrations impulsionnelles sont converties en signaux électriques par un second transducteur «récepteur» [IAEA, 2002]. Les circuits électroniques de temporisation permettent de mesurer le temps de transit de l'impulsion.

Plusieurs compositions de béton sont soumises aux trois types d'essais de caractérisation de la ségrégation, en plus de l'essai d'étalement. La méthode des essais par colonne mesure à la fois la ségrégation et la sédimentation plastique, la sédimentation plastique est affectée par la ségrégation, le ressuage, et le temps de prise. En revanche, la méthode au tamis ne mesure que la ségrégation.

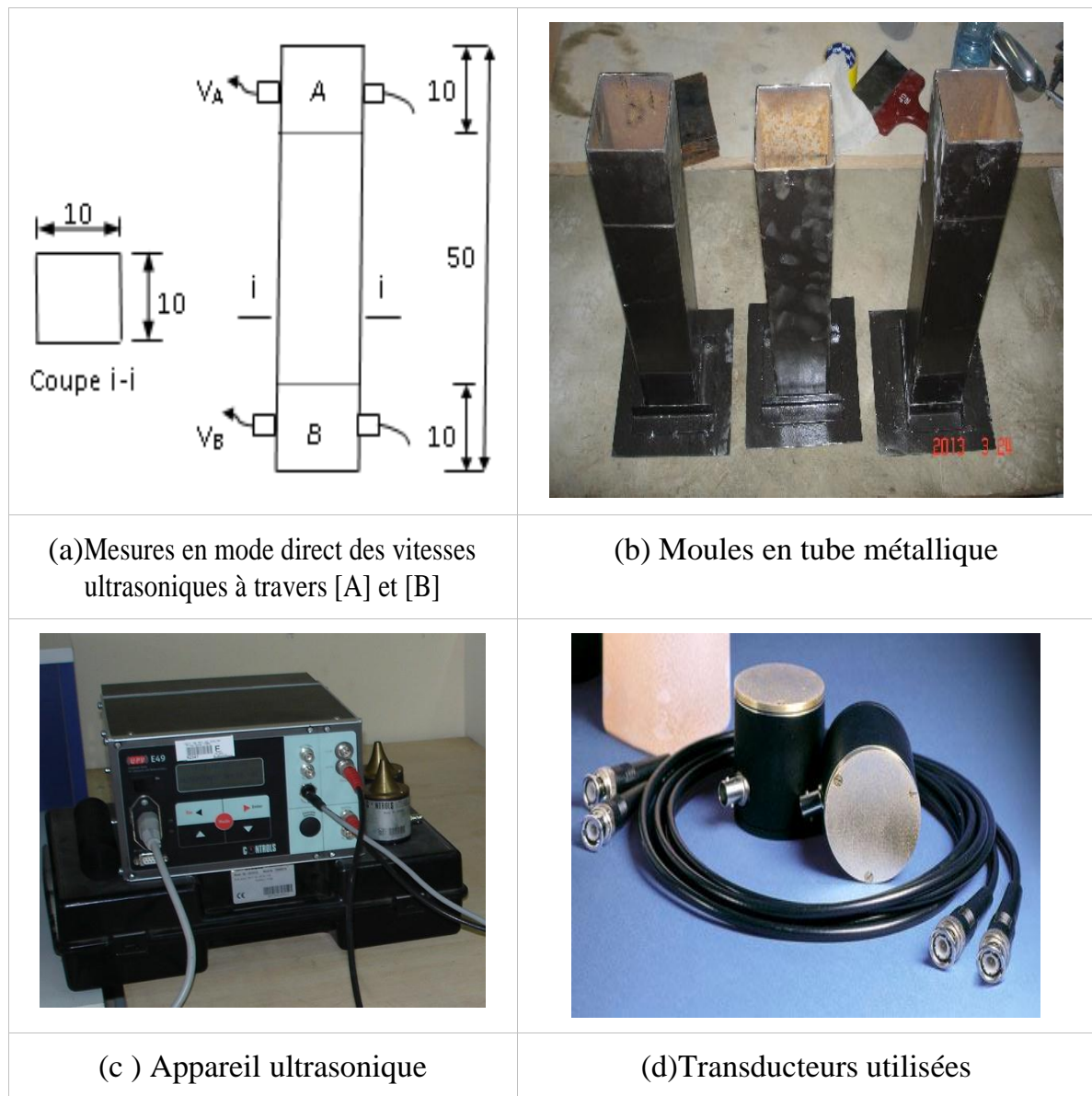


Figure.III.4- Procédure de la détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons " f_u "

III.2- Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont des produits locaux ; ciment portland ordinaire (CEM II-A, 42,50), des fillers calcaires [0/80 μm] pour modifier la viscosité et un super plastifiant à base de poly-carboxylate.

Les granulats fins (sable) avaient une granulométrie maximale de 5 mm, un module de finesse de 2,56 et une densité de 2,53. Les gros granulats (gravier) avaient une taille maximale de 15 mm, une densité de 2,67. Les compositions

chimiques du ciment portland, des fillers et de l'adjuvant sont données par le tableau III.1.

Les distributions granulométriques des fillers calcaires, et des granulats sont présentées par les figures III.5 et III.6.

Tableau III.1- Propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés.

Facteur	Ciment	Fillers	Superplastifiant
CaCO ₃ (%)	-	98.00	-
CaO (%)	55 - 65	56.03	-
SiO ₂ (%)	22 - 28	0.04	-
Al ₂ O ₃ (%)	5 - 6	0.08	-
Fe ₂ O ₃ (%)	3 - 3.6	0.02	-
MgO (%)	1 - 2	0.17	-
K ₂ O (%)	0,3 - 0.6	0.02	-
NaO ₂ (%)	0,1 - 0.16	0.05	-
SO ₃ (%)	1,8 - 2,5	0.0021	-
CaOL (%)	0,8 - 1.8	/	-
cl ⁻	0 - 0.01	0.0033	< 1
Perte au feu (%)	-	43	-
Densité (kg/l)	3.15	2.7	1.2
Blaine (cm ² /g)	3300 - 4000	-	-
Ph	-	9	8.2
Début de prise (mn)	≥ 60	-	-
Fin de prise (mn)	150-250	-	-

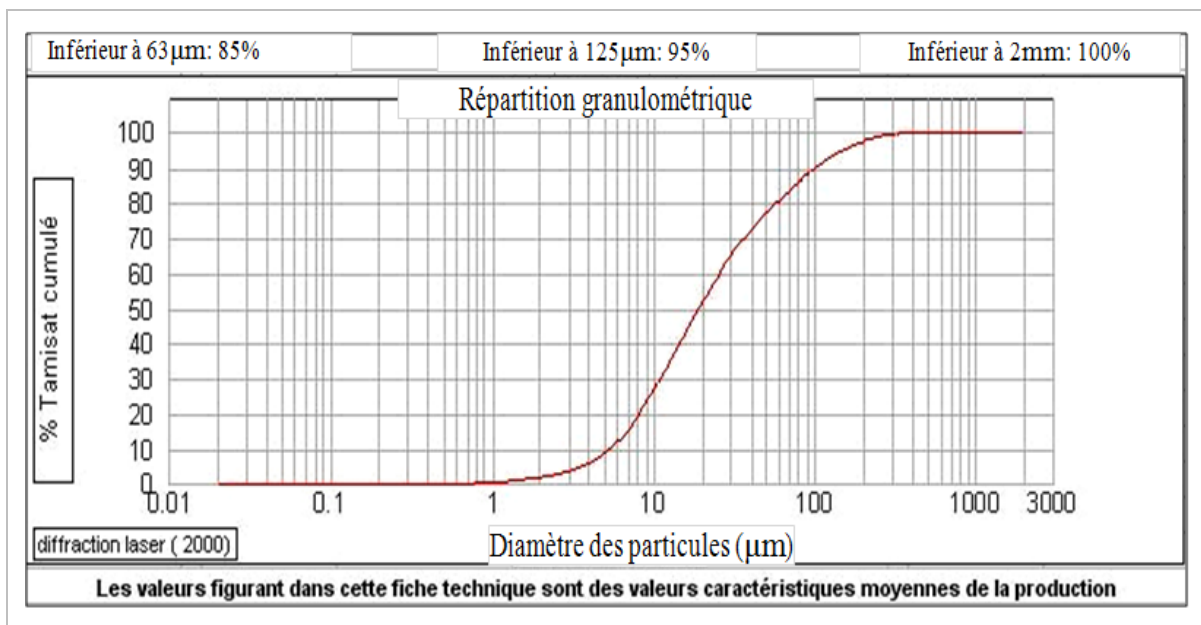


Figure III.5- Courbes granulométriques du filler utilisé ;
Source ENG el khroub [ENG, 2012].

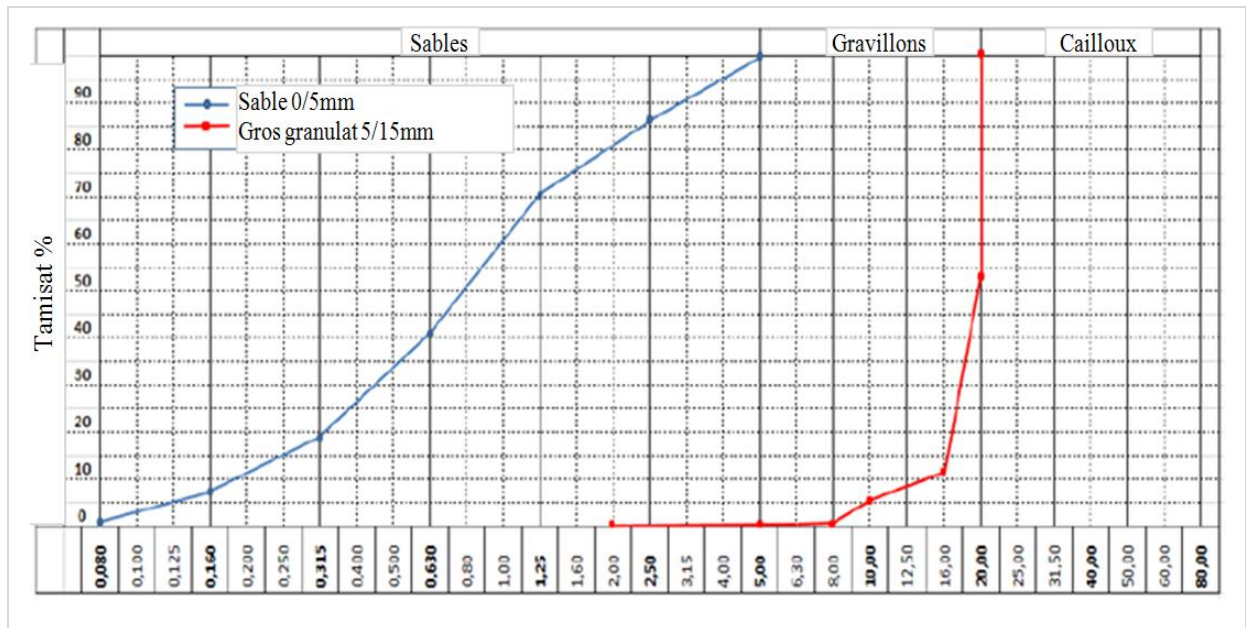


Figure III.6- Courbes granulométriques des granulats utilisés

III.3- Formulation des bétons d'étude

Dans cette section, nous présenterons une étude de la formulation des bétons à base de fillers calcaires comme addition et sans agent de viscosité.

Dans ce travail, on a utilisé une gamme de constituants disponibles localement, en suivant les démarches de la méthode d'Okamura [Okamura et Ouchi 2003].

Nous avons lancé un certain nombre d'investigation, sur les compositions des bétons pour essayer d'adapter la méthode et pour l'obtention de bétons qui répondent aux exigences d'une bonne fluidité et une stabilité accrue.

Les différents constituants utilisés sont :

- ciment du type (CEM II/A, 42.50) de Hajer-Essoud, Skikda.
- des fillers calcaires UF20 (0/80 μm) de la carrière ENG de Khroub,
- des granulats (sable et gravier) de la carrière « SAIPAM » Guelma,
- un super-plastifiant Medaplast SP40 de Granitex,
- L'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'université 8 mai 1945, Guelma.

Toutes les caractéristiques des constituants utilisés sont rassemblées et présentées en annexes.

III.3.1- Détermination des paramètres de formulation

- Le Super-plastifiant

Il est noté que le dosage en super-plastifiant des bétons diminue avec l'augmentation du rapport F/C+F et que la consommation en adjuvant des fillers est inférieure à celle du ciment [Bensebti, 2008]. On peut facilement déduire pour n'importe quelle combinaison Ciment-Fillers, le dosage de saturation en connaissant le dosage de saturation d'un coulis de ciment pur (de l'ordre 1,8 à 2%) et celui de l'ajout (fillers pur, de l'ordre de 0,8%). La relation obéit à la relation suivante :

$$SP = F \times SP_F + C \times SP_C \quad (\text{III.4})$$

Avec :

SP, le dosage de saturation du mélange F+C, SP_F , et SP_C , respectivement les dosages de saturation du coulis de fillers et de ciment, C et F, sont les proportions rapportées à l'unité du ciment et du fillers dans le mélange.

Donc, et afin de réduire le nombre de paramètres lors de l'optimisation de la composition du mortier le dosage en super-plastifiant des bétons étudiés a été fixé au dosage de saturation.

- Les fillers calcaires

Le rapport F/C+F, [Fillers / (Ciment +fillers)] est égal à 0,00 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; et 0,25. Ce dernier qui est généralement dicté par des considérations de résistance ciblée et aussi par les considérations de durabilité.

Pour chaque mélange [filler calcaire + ciment] et un rapport [Eau / (Liant)] il existe un dosage en super-plastifiant (dosage de saturation) au-delà duquel aucun gain de fluidité n'est possible.

- L'eau

La fluidité du liant est très influencée par la quantité d'eau de gâchage, pour cela on a pris le dosage de super-plastifiant (à la saturation du liant) en faisant varier le rapport E/L de 0,32 à 0,48.

Pour optimiser la composition des bétons, on a fixé le dosage en superplastifiant à la saturation puis de ne faire varier que le dosage en eau, si nécessaire, pour obtenir la fluidité voulue. Cette fluidité sera caractérisée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

III.4- Compositions des bétons

Ce travail vise à évaluer l'applicabilité des mesures de vitesse ultrasonore à divers mélanges de béton pour mesurer la ségrégation.

Ainsi, les formulations de béton étaient basées sur les exigences de la méthode japonaise décrites par [Okamura et Ouchi 2003] pour la formulation des bétons auto-plaçant et comme elle est décrite dans l'annexe 1.

III.4.1- Dosage des granulats

Le dosage en fines favorise d'atteindre une porosité minimale du squelette solide. Les résultats présentés sur la courbe granulométrique mettent en évidence ce dosage.

$$V_{Granulats} = 1000 - V_{Pâte} \quad (III.5)$$

Avec $V_{Pâte}$, le volume de pâte : $V_{Pâte} = V_C + V_E + V_F$

Connaissant le volume total absolu des granulats et les pourcentages en volume absolu de sable (S %) et de gravillon (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_S) de gravillon (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S et G) :

$$\begin{aligned} V_{absolu\ sable} &= V_{granulats} \times S \% \\ \rightarrow S &= \frac{V_{absolu\ sable}}{V_{granulats}} \times 100 \end{aligned} \quad (III.6)$$

$$\begin{aligned} V_{absolu\ gravillon} &= V_{granulats} \times G \% \\ \rightarrow G &= \frac{V_{absolu\ gravillon}}{V_{granulats}} \times 100 \end{aligned} \quad (III.7)$$

Avec ρ_s et ρ_G respectivement la masse volumique de sable et de gravillon.

Dans cette étude, le dosage en gravier est fixé à 50 % de sa compacité γ et celui du sable à 40 % du volume total du mortier. Idéalement, le volume de la pâte devrait permettre au béton de circuler, tout en minimisant le coût des matières premières.

$$\text{Compacité : } \gamma = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$$

Avec

ρ_{app} : Masse volumique apparente,

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

III.4.2- Vérification des compositions

En utilisant donc une gamme de constituants disponible, cité en haut, et souvent utilisés localement, nous avons entamé un travail de formulation comme suite :

Au début nous avons formulé trois (03) bétons tels que le rapport (F/C+F) est égal à 0 (F=0) ; 0,13 (F=0,15C) ; et 0,20 (F=0,25C).

Les trois bétons sont présentés dans le tableau.III.3, suivant :

Tableau.III.2- Composition des bétons d'essai

Désignation	Paramètres de formulation			Dosage en Kg/m ³						Béton (kg)
	a= F/C+F	b= SP/C+F	d= E/C+F	G	S	C	F	E	SP	
B1	0,00	2,00	0,48	775	736	500	0,00	240	10	2261
B2	0,13	1,82	0,46	775	736	440	66	231	9,00	2257
B3	0,20	1,70	0,45	775	736	407	102	228	8,67	2257

III.4.2.1- Gâchées d'essais et caractérisation des bétons

Les bétons formulés (présentés dans le tableau III.3), ont été testés pour vérifier si les objectifs visés sont bien atteints. En l'occurrence, un étalement proche de 70 cm. (Selon les prescriptions du Guide Européen pour les bétons auto-plaçant [EFNARC, 2005]). Les essais réalisés pour chaque béton sont :

- L'étalement ;
- L'essai de stabilité au tamis ;
- L'essai à la boîte en L.

On procède par des corrections des compositions pour obtenir l'étalement souhaité (66 cm et plus). Le dosage du sable étant déjà très élevé, les corrections doivent être opérées sur les compositions du coulis. Par conséquent, sur les quantités d'eau et de super plastifiant.

Afin d'ajuster les compositions, nous avons agi par l'augmentation du dosage en eau. Cette augmentation qui se traduit par l'augmentation du rapport $E/C+F$, car

l'augmentation du dosage en super plastifiant ne permet pas de faire augmenter sensiblement l'étalement des bétons [Okamura1995] [Bensabti2008].

Ainsi, nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants. Les résultats des essais obtenus sont :

➤ **Béton B 1 (F =0)**

Tableau III.3-a. Evolution de l'étalement du béton B1

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	T40(S)	OBS
B 1	B							
B1-a	0,00	2,00	0,38	49,00	2,02	0,61	-	✘
B1-b	0,00	2,00	0,40	32,00	-	-	-	✘
B1-c	0,00	2,00	0,45	42,00	-	-	-	✘
B1-d	0,00	2,00	0,48	70,00	17,87	0,80	4,8	✓

➤ **Béton B 2 (F =0.15C)**

Tableau III.3-b. Evolution de l'étalement du béton B2

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	T40(S)	
B2								
B2-a	0,13	1,82	0,75	77,50	23,00	0,69	1,95	✘
B2-b	0,13	1,82	0,53	73,5	13,00	0,80	1,07	✓
B2-c	0,13	1,82	0,46	72.50	8,12	0,70	1,95	✘
B2-d	0,13	1,82	0,43	71,50	16,90	0.75	2.05	✓

➤ **Béton B 3 (F =0.20C)**

Tableau III.3-c. Evolution de l'étalement du béton B3

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	T40(S)	OBS
B3								
B3-a	0,20	1,70	0,40	62,00	6,18	0,66	-	✘
B3-b	0,20	1,70	0,41	71,50	19,40	0,80	2,44	✓
B3-c	0,20	1,70	0,45	73,00	22,40	0,85	1,95	✓
B3-d	0,20	1,70	0,50	75,00	24,70	0,84	1,07	✘

L'ajout d'eau a permis une augmentation de l'étalement. Cependant, il est essentiel de ne pas perdre de vue l'aspect de la cohésion du béton qui doit être vérifié.

On sait que l'augmentation du dosage en eau provoque une diminution de la cohésion au sein du mélange qui peut entraîner des phénomènes de ségrégation très préjudiciables. C'est pour cette raison que nous avons testé, en plus de l'étalement, pour chaque mélange étudié ; la stabilité au tamis, l'essai à la boîte en L et la mesure de la vitesse d'écoulement¹. Ces mesures qui permettent d'apprécier la stabilité et la capacité de remplissage du béton.

En analysant les résultats obtenus, on peut déterminer pour chaque béton (B1 à B3), le béton à retenir. En se référant au «guide Européen pour les bétons Auto-plaçants» [EFNARC, 2005], le béton à retenir est par définition celui qui présente :

- Un étalement proche de 70 cm ;
- Une stabilité au tamis inférieure ou égale à 23% ;
- Un rapport à la boîte en L supérieur à 0,75.

Les paramètres de formulation retenus sont donc rassemblés dans le tableau III.3-d.

Tableau III.3.d-Paramètres de formulation et caractéristiques des bétons corrigées et ajustées.

Désignation	a= F/C+F	b= SP /C+F	d= E/C+F	Etalement (cm)	Stabilité (%)	Boite en L	Appellation par la suite
B1= B1-d	0,00	2,00	0,48	70,00	17,87	0,80	C01
B2= B2-d	0,13	1,82	0,43	71,50	16,90	0,75	C06
B3= B3-b	0,20	1,70	0,45	70,00	19,40	0,85	C08

On a procédé de la même façon, pour les autres bétons, avec des corrections des compositions pour obtenir l'étalement souhaité (66 cm et plus).

Ainsi, nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants. Les résultats des essais obtenus sont rassemblés dans les tableaux (III.4 et III.5).

En suivant les recommandations de la méthode japonaise, nous avons formulé des bétons tels que le rapport F/F+C est égal à 0,00 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; et 0,25 et nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants (tab. III.4).

¹Mesure effectuée lors de l'essai d'étalement. C'est la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 40 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 4 et 10 secondes [Hasni, 1999].

Tableau III.4- Dosage en fillers des bétons.

Désignation		Rapport pondéral (Fillers/Ciment)	Rapport pondéral (Fillers/Ciment + Fillers)
		%	%
C01	C09	0	0,00
C02	C10	5	4,76
C03	C11	10	9,09
C04	-	12	10,71
C05	-	14	12,28
C06	C12	16	13,79
C07	-	18	15,25
-	C13	20	16,67
C08	C14	25	20,00

Les compositions des mélanges testés sont présentées dans le tableau III.5.

Tableau III.5- Compositions des mélanges testés.

Béton	Proportions en kg/m ³						a^* =	b^* =	d^* =
	Gravier (5-15 mm)	Sable (0-5 mm)	Ciment (C)	Fillers (F)	Eau (E)	Super- Plastifiant(S_p)	F/L (%)	S_p/L (%)	E/L (%)
C01	775	736	495	0,0	237,8	9,91	0,00	2,00	48
C02	775	736	477	24	235,2	9,71	4,76	1,94	47
C03	775	736	460	46	232,5	9,50	9,09	1,88	46
C04	775	736	457	55	230,2	9,49	10,71	1,86	45
C05	775	736	454	64	227,8	9,48	12,28	1,83	44
C06	775	736	452	72	225,3	9,47	13,79	1,81	43
C07	775	736	450	81	222,8	9,46	15,25	1,78	42
C08	775	736	429	107	219,8	9,11	20,00	1,70	41
C09	775	736	618	0,0	198,0	12,35	0,00	2,00	32
C10	775	736	577	29	200,0	11,76	4,76	1,94	33
C11	775	736	550	55	200,0	11,37	9,09	1,88	33
C12	775	736	528	84	196,0	11,06	13,79	1,81	32
C13	775	736	509	102	195,0	10,75	16,67	1,76	32
C14	775	736	488	122	195,0	10,36	20,00	1,70	33

* [L ; liant, ($a=F/L$) ; taux filler/liant, ($b=Sp/L$) ; taux super-plastifiant/liant, ($d=E/L$) ; taux eau / liant.]

Dans tous les mélanges, la quantité de granulats est maintenue constante, la quantité de super-plastifiant correspond au dosage de saturation du liant (1,7% à 2%) et la quantité des autres constituants est variable : les fillers (0% à 20%), et l'eau (32% à 48%) par rapport aux quantités du liant.

III.5- Procédures des Essais

Tout d'abord, un tamis perforé à trous carrés de 5 mm, d'un diamètre de cadre de 300 mm et d'une hauteur de 40 mm, a été utilisé pour les essais de stabilité au tamis [ISO 2004]. La colonne utilisée pour évaluer la résistance à la ségrégation était un tube carré en acier de 500 mm de hauteur et de 100 x 100 mm de section.

Ce même tube a également été utilisé pour les essais ultrasoniques, où des transducteurs sont fixés à l'extérieur de la colonne d'acier, qui doivent être couplés à la surface par un moyen approprié (par exemple de la graisse) à chacune des deux extrémités (figures III.1. a, b, c et d), [Kumavat et al 2014]. Ces procédures ont été appliquées aux mélanges énumérés dans le tableau III.3.

Les travaux expérimentaux menés sur les mélanges du tableau III.2 ont concerné les procédures suivantes (fig. III.7) :

1. La méthode au tamis en utilisant l'équation (III.1) ;
2. La méthode à la colonne en utilisant l'équation (III.2) ;
3. La méthode à vitesses ultrasoniques proposée en utilisant l'équation (III.3).

III.5.1- Caractérisation des bétons frais

L'auto-plasticité des bétons nécessitent :

1. un étalement compris entre 640 mm et 720 mm, à condition que le béton soit homogène et ne présente aucun signe de saignement (fig. III.8),
2. un rapport H_2 / H_1 supérieur à 0,80 pour la boîte en "L"
3. et un indice de ségrégation π compris entre 0 et 15%.





1 ^{ère} étape	Essais de stabilité au tamis [EFNARC, 2005]		 Dédution des Corrélations
2 ^{ème} étape	Essais ultrasoniques (nouvellement développé)		
3 ^{ème} étape	Essais de stabilité à la colonne [BS 1881, Rooney et al, 2001, Cussigh et al, 2003, et Sonebi, 2005]		

Figure III.7- Procédures de caractérisation de la ségrégation des bétons




		
Preuve d'un halo de mortier et d'un éclat d'eau.	Concentration de gros granulats au centre de la masse de béton et présence d'un halo de mortier.	La masse du béton est homogène et ne présente aucun signe de saignement.

Figure III.8- Evaluation visuelle de la stabilité apparente des bétons

III.5.2- Caractérisation de la ségrégation

Une fois que les mélanges sont prêts, les essais sont immédiatement effectués pour évaluer la résistance à la ségrégation. Cela a été réalisé consécutivement par les essais au tamis, les mesures des vitesses ultrasoniques à travers les deux parties extrêmes de la colonne (vide puis remplie par le béton) et enfin les essais de mesure des masses des gros granulats sur les mêmes bétons testés précédemment.

Pour les essais à la colonne, plusieurs techniques de caractérisation de la ségrégation ont été rapportées dans la littérature [Kumavat et al 2014, Lowke et al 2003]. Dans notre cas, le béton frais a été placé dans un tube (section 100 x 100 mm, hauteur 500 mm). Le béton a été prélevé sur les parties supérieure de la colonne (A = 100 x 100 x 100 mm) et inférieure (B = 100 x 100 x 100 mm).

Après avoir été lavés à travers un tamis, les échantillons ont été analysés pour déterminer la proportion de gros granulats. La résistance à la ségrégation f est exprimée par le rapport entre la masse globale des gros granulats dans la partie supérieure et la masse des gros granulats dans la partie inférieure où le critère d'évaluation de la ségrégation est :

- $f > 0,95$: une bonne résistance à la ségrégation.
- $f < 0,90$: une tendance à la ségrégation.

III.5.3- Mesures des vitesses ultrasoniques

Le coefficient ultrasonique de résistance à la ségrégation proposé est donné par l'équation III.3. La mesure consiste à déterminer le temps de propagation des ondes ultrasonores à travers le béton frais aux deux parties extrêmes ; supérieure (A) et inférieure (B) des échantillons (fig.III.4- a et b). Pour cela, une paire de transducteurs, de 54 kHz, a été utilisée (figures III.4-d) : l'un servant de source (émetteur) et l'autre de récepteur. Selon la norme européenne EN 12504-4 [NF EN, 2005], le mode de transmission directe a été effectué.

III.6- Conclusion

Ce chapitre a été consacré en premier lieu aux procédures expérimentales et qui s'articulent sur des essais comparatifs de la caractérisation de la ségrégation pour différentes compositions de béton. La comparaison concerne deux techniques standards (tamis et colonne) par rapport à un essai non destructif par

le biais d'impulsions ultrasoniques. Les essais ont été réalisés sur des mélanges conçus pour avoir différents niveaux de résistance à la ségrégation.

La deuxième partie est consacrée à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation des bétons et leurs proportions et propriétés physico-chimiques pour atteindre cet objectif.

Les mélanges ont été préparés sans et avec en une addition minérale (fillers calcaires) *F*. La confection des mélanges a été effectuée selon les normes en vigueur.

Après caractérisation des bétons, le chapitre suivant discutera les résultats obtenus et les possibles corrélations entre les divers indices de ségrégation. Ceci pour évaluer la fiabilité de cette méthode non destructive quant à la caractérisation de la ségrégation des bétons par rapport aux méthodes traditionnelles.

Chapitre **III** Méthodologie expérimentale

Chapitre **IV** Synthèse et interprétation
des résultats

Chapitre IV Synthèse et interprétation des résultats

IV.1- Introduction

On présente dans ce chapitre les résultats obtenus lors des essais et leur interprétation pour en tirer des conclusions.

A partir des résultats des essais réalisés on essaye d'établir les relations qui peuvent exister entre les différentes propriétés étudiées.

On prospecte donc l'effet de la composition, se limitant aux seuls rapports E/L et F/L, sur les différents indices de ségrégation. A savoir, l'étalement, la stabilité au tamis, la résistance à la ségrégation ainsi que l'indice ultrasonique de ségrégation proposé par notre étude.

IV.2- Présentation des résultats

Les résultats des différents essais de caractérisation réalisés sur les bétons confectionnés sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1- Les différents indices de ségrégation des bétons

Béton	a=	b=	d=	Diamètre	Indice	Indice	Indice
	F/L	SP/L	E/L	d'étalement	à l'ultrason	à la Colonne	au tamis
	(%)	(%)	(%)	S_f (cm)	$f_u=V_A/V_B$ (%)	$f=A/B$ (%)	π (%)
C1	0,00	2,00	48	70,50±1,00	90,80 ± 3,52	58,30 ± 0,10	24,08
C2	4,76	1,94	47	71,50±1,00	90,70 ± 0,40	59,80 ± 4,30	16,49
C3	9,09	1,88	46	73,50±1,20	88,20 ± 1,82	53,60 ± 5,10	16,84
C4	10,71	1,86	45	78,00±1,40	88,60 ± 0,83	52,00 ± 4,20	16,12
C5	12,28	1,83	44	71,00 ± 1,00	89,50 ± 0,52	46,10 ± 4,60	16,08
C6	13,79	1,81	43	71,50 ± 0,80	87,20 ± 1,24	58,50 ± 3,80	16,91
C7	15,25	1,78	42	75,50 ± 0,80	87,20 ± 2,34	57,40 ± 1,80	16,23
C8	20,00	1,70	41	71,00 ± 0,70	84,10 ± 0,29	47,70 ± 2,80	23,53
C9	0,00	2,00	32	69,00 ± 0,10	99,80 ± 0,02	95,30 ± 0,70	6,60
C10	4,76	1,94	33	70,50 ± 0,50	99,50 ± 0,33	95,20 ± 0,20	6,35
C11	9,09	1,88	33	67,00 ± 0,30	99,80 ± 0,23	95,10 ± 0,50	3,30
C12	13,79	1,81	32	71,00 ± 0,60	99,90 ± 0,02	95,10 ± 2,20	8,90
C13	16,67	1,76	32	61,50 ± 0,30	99,90 ± 0,08	96,40 ± 1,60	4,67
C14	20,00	1,70	33	71,50 ± 0,10	99,00 ± 0,64	95,30 ± 2,50	11,45

IV.2.1- L'ouvrabilité

La caractérisation à l'état frais des bétons auto-plaçants (BAP) se fait par les essais recommandés par l'Association Française de Génie Civil. [l'AFGC 2000], à savoir l'étalement au cône, l'écoulement à la boîte en « L » et la stabilité au tamis.

L'utilisation d'un BAP demande de valider ces trois essais pour son auto-plasticité (alors pour le béton ordinaire, on se limite au seul essai d'affaissement pour son ouvrabilité).

Donc l'étude de l'ouvrabilité du béton frais ne peut être envisagée sans prendre en considération les phénomènes de fluidité et de risque de blocage qui interviennent lors de la mise en place de ce matériau. On se limite dans ce paragraphe à la seule discussion de l'évolution de l'étalement au cône d'Abrams. Tous les bétons étudiés ici présentent un d'affaissement supérieur à 60cm. Ces bétons présentent une fluidité acceptable, donc on s'est affranchi de les tester au L-box (la capacité de passage du béton) car notre objectif est le problème de la caractérisation de la ségrégation.

Les valeurs de l'étalement pour les différents bétons obtenues immédiatement après le processus de malaxage sont présentées sur la fig. IV.1.

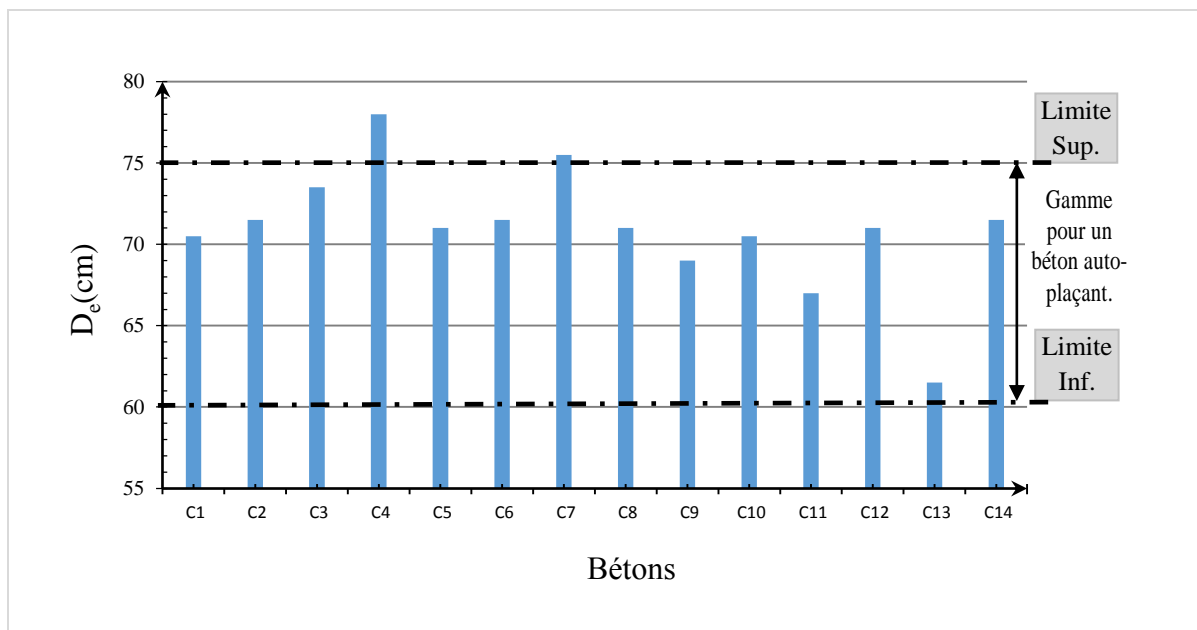


Figure IV.1- Diamètres d'étalement (D_e) des différents bétons.

Les résultats des essais d'étalement de quelques bétons (C4 et C7) dépassent légèrement la valeur supérieure autorisée. Les lignes directrices européennes [Testing-SCC, 2005] suggèrent une valeur de diamètre d'étalement allant de 60 à

75cm pour un béton auto-plaçant. A plus de 75cm, le béton pourrait se séparer, et à moins de 60cm, le béton pourrait avoir une fluidité insuffisante pour traverser un ferrailage très condensé. Tous les bétons étudiés ici présentaient un écoulement d'affaissement supérieur à 60cm. Ces bétons présentent une fluidité acceptable sans risque de blocage.

IV.2.2- L'indice de la ségrégation au tamis

Pour les bétons C1 à C8, la stabilité au tamis est entre 15 et 30% (tab IV.2 et fig. IV.2-a), cette stabilité est jugée critique.

Tableau IV.2- Résultats des essais de stabilité au tamis.

Béton	π (%)
C1	24,08
C2	16,49
C3	16,84
C4	16,12
C5	16,08
C6	16,91
C7	16,23
C8	23,53
C9	06,60
C10	06,35
C11	03,30
C12	8,90
C13	04,67
C14	11,45

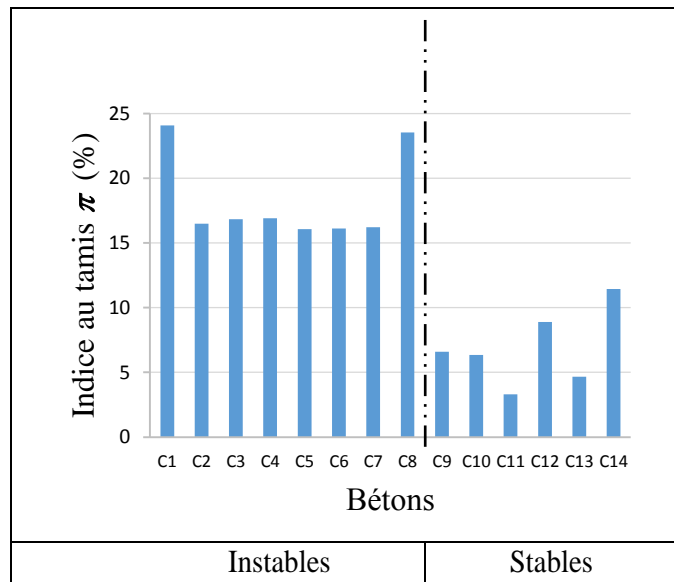


Figure IV.2-a. Indices de stabilité au tamis (π)

Chacun des mélanges C1 à C8 s'est révélé instable, l'indice de ségrégation au tamis π dépasse les 15%. Pour les bétons stables (C9 à C14), cet indice variait de 3,30% à 11,45%.

IV.2.3- L'indice de ségrégation à la colonne

De même pour les bétons C1 à C8, la stabilité à la colonne est entre 45 et 65% (fig. IV.2-b), la stabilité est aussi jugée critique.

Les essais à la colonne (tab IV.3 et fig. IV.2-b) montrent que la masse des gros granulats est restée presque constante dans le cas des bétons stables (C9 à C14).

Pour ces bétons, la moyenne des écarts type était de 0,95% et ne variait que de 0,2% à 2,50%. Pour les bétons instables (C1 à C8) on a un ordre de grandeur plus élevé. La moyenne des écarts type est plus importante (1,68%) impliquant une grande variation de l'évolution du mouvement des gros granulats. L'indice de ségrégation à la colonne varie de 95,10% à 96,40% pour les bétons stables et celui des bétons instables de 46,10% à 64,30%.

Tableau IV.3- Résultats des essais de ségrégation à la colonne

Mixture	Top part -A-	Top part -B-	$f(\%)$
C1	0,46	0,78	58,30
C2	0,51	0,80	64,30
C3	0,43	0,80	53,60
C4	0,40	0,75	52,00
C5	0,44	0,95	46,10
C6	0,55	0,96	58,50
C7	0,49	0,86	57,40
C8	0,40	0,84	47,70
C9	0,71	0,74	95,30
C10	0,79	0,83	95,20
C11	0,75	0,79	95,10
C12	0,85	0,89	95,10
C13	0,71	0,73	96,40
C14	0,71	0,74	95,30

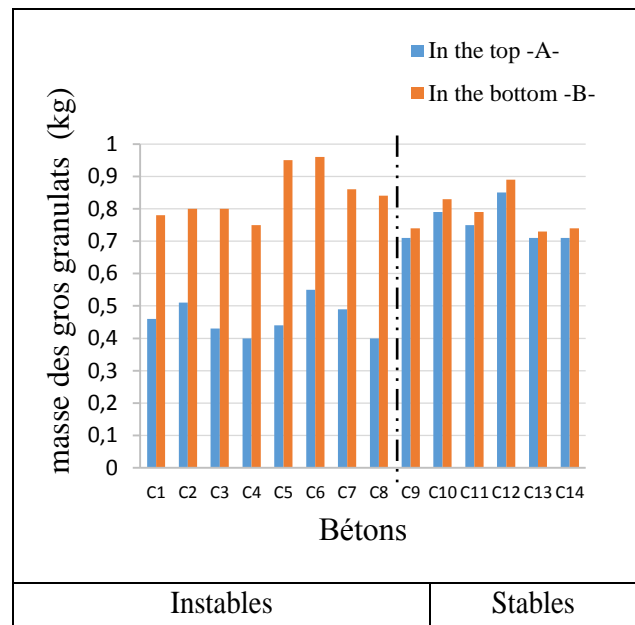


Figure IV.2-b Masses des gros granulats des différentes parties de la colonne.

IV.2.4- L'indice ultrasonique de ségrégation

Les résultats de l'indice ultrasonore de ségrégation sont exprimés par le rapport de la vitesse ultrasonore à travers la partie supérieure par celle à travers la partie inférieure B. Les bétons C1 à C8 ont un indice ultrasonique variant entre 80% et 92% (fig. IV.2-c).

La vitesse ultrasonique reste presque constante dans le cas des mélanges stables (C9 à C14) (tab IV.2 et figure IV.2-c). Les vitesses varient entre 2533m/s et 2591m/s dans la partie supérieure et entre 2557 m/s et 2597 m/s dans la partie inférieure. Pour ces bétons, la moyenne des écarts type était de 0,24% alors que pour les bétons instables (C1 à C8), la moyenne des écarts type est de 1,12%. Ceci s'est reflété par des indices ultrasoniques variant entre 84,10% et 90,80% pour les bétons instables et entre 99% et 99,9% pour les bétons stables.

Tableau IV.4- Résultats des essais ultrasoniques

Béton	V _A (m/s)	V _B (m/s)	f _u (%)
C1	2199	2421	90,80
C2	2281	2515	90,70
C3	2234	2533	88,20
C4	2233	2520	88,60
C5	2232	2493	89,50
C6	2193	2514	87,20
C7	2132	2444	87,20
C8	2133	2536	84,10
C9	2560	2565	99,80
C10	2567	2580	99,50
C11	2591	2597	99,80
C12	2560	2561	99,90
C13	2559	2561	99,90
C14	2533	2557	99,00

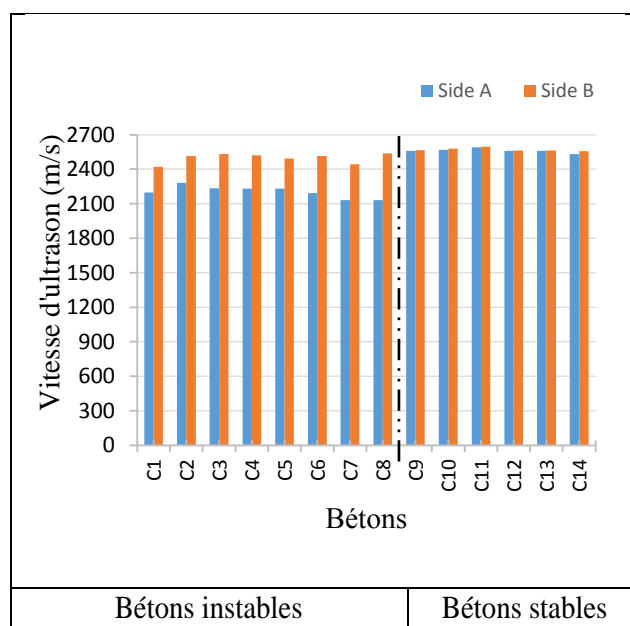


Figure IV.2-c. Vitesses ultrasoniques à travers les deux parties de la colonne

IV.2.5- Conclusion

On remarque clairement la formation de deux groupes des bétons, un groupe de bétons instables (C1-C8) et un autre de bétons stables (C9-C14) du point de vue ségrégation (fig. IV.3). Ce groupage se retrouve aussi vis-à-vis de la caractérisation non destructive par les ultrasons ($60\text{mm} < D_e < 75\text{mm}$, $\pi < 15\%$, $f > 95\%$ et $f_u > 98\%$) comme l'indique la figure IV.3. Ceci implique que cette technique reflète bien l'état de la distribution des granulats dans les bétons. Elle peut s'avérer une alternative aux autres essais de caractérisation de la ségrégation.

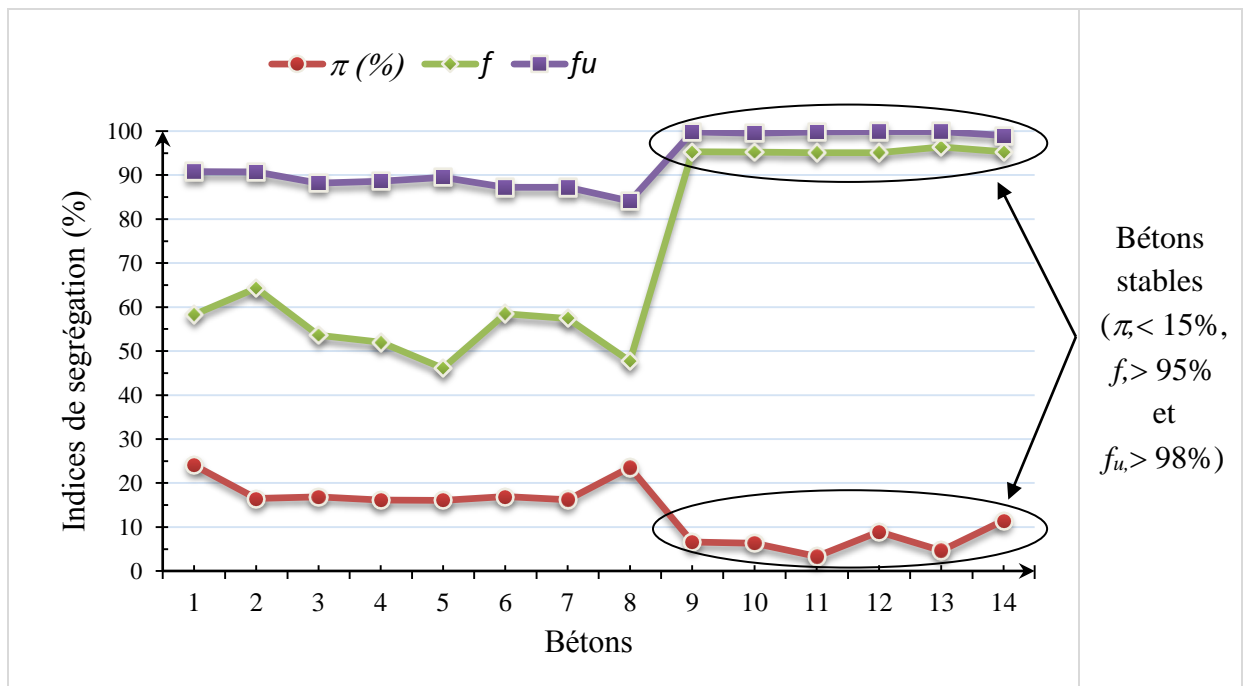


Figure IV.3- Indices de ségrégation des différents bétons (tamis, colonne et ultrason)

IV.3- Effet de la composition sur les indices de ségrégation des bétons

Plusieurs caractéristiques des bétons ont été mesurées et les influences de certains paramètres par rapport au liant (qui est souvent une combinaison de ciment et d'additions fines) tels que, E/L et F/L , ont été appréciées.

IV.3.1- Effet du rapport E/L

La fluidité du liant est très influencée par la quantité d'eau de gâchage et bien sûr par le dosage en super-plastifiant. Le dosage en super-plastifiant est fixé à son dosage à la saturation, on a fait varier le rapport E/L de 0,32 à 0,48. L'étalement le plus faible ($D_e = 61,5$ cm) correspond au plus faible rapport E/L (0,32). Selon les figures IV.4-b, c, d, il est à noter que le risque de ségrégation estimé à partir de trois essais, commence à devenir important quand le rapport E/L dépasse les 40%.

A travers la figure IV.4-a, on constate qu'une diminution du rapport E/L de 33%, pour les bétons sans fillers (C9, C1), conduit à une faible diminution de l'étalement (moins de 3%). Alors de Benhamou [Benhamou, 2008] note des diminutions de 13 % et 16 % de l'étalement respectivement pour des diminutions des rapports E/C de 20 % et 50%. Ceci s'explique par l'effet prédominant du plastifiant qui a été utilisé dans nos bétons.

Les bétons avec fillers (par exemple C8 et C14), présentent aussi une variation minimale de leurs étalements avec l'évolution du rapport E/L, toujours expliquée par la même raison.

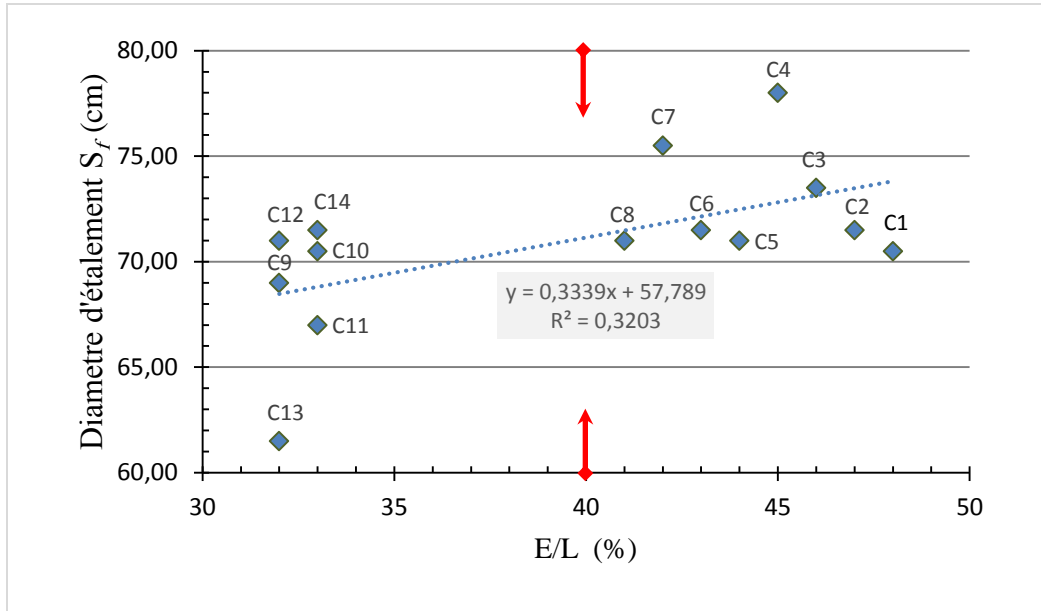


Figure IV.4.a- Evolution de l'étalement en fonction du rapport E/L .

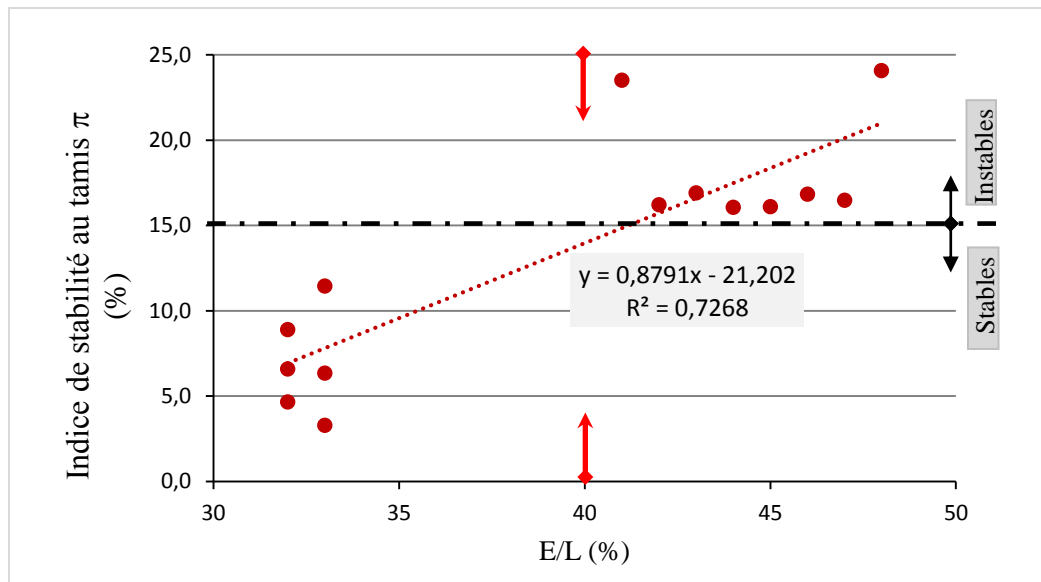


Figure IV.4-b- Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport E/L .

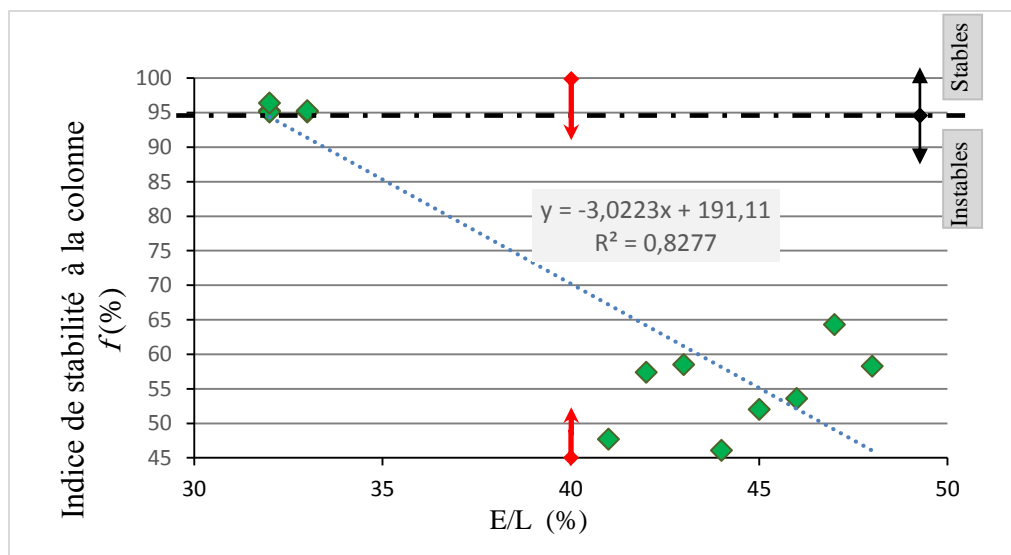


Figure IV.4-c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport E/L .

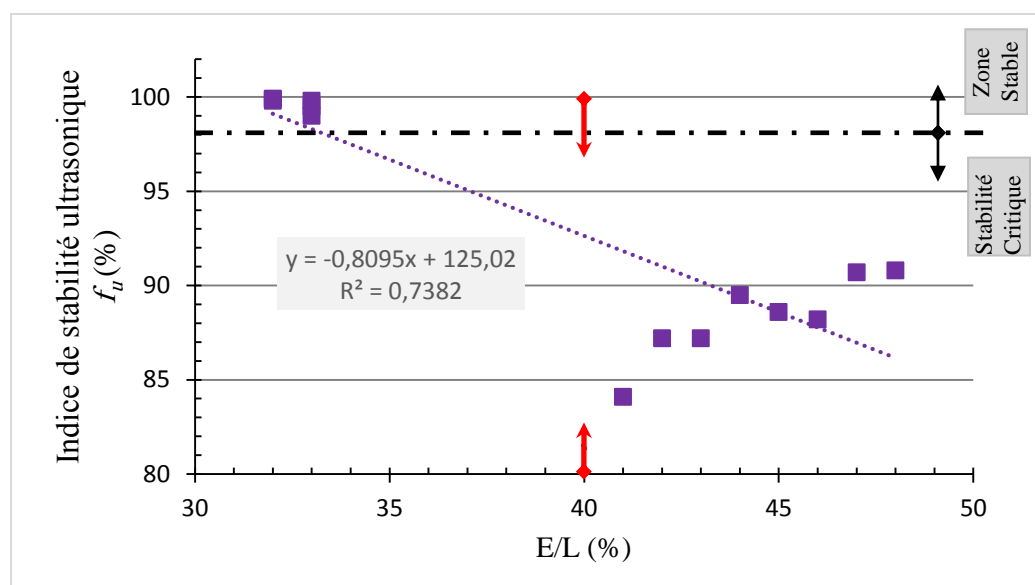


Figure IV.4-d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport E/L .

L'augmentation du rapport E/L provoque en général une augmentation de manière significative de la fluidité du béton en réduisant la viscosité de la matrice du mortier. Elle réduit aussi la capacité de maintenir une distribution uniforme des gros granulats dans cette matrice (Hernandez, 2016).

Les figures (IV.4-b, IV.4-c et IV.4-d) présentent les évolutions des indices de ségrégation, obtenus pour les trois essais de ségrégation des bétons, en fonction du rapport eau-liant (E/L).

En général, l'augmentation du rapport E/L a conduit à une augmentation de l'indice de stabilité au tamis et à une diminution de ceux de la colonne et des ultrasons pour les 14 compositions de béton. La non ségrégabilité des bétons par les trois indices simultanément est obtenue pour des rapports E/L inférieurs à 0,33 ($f_u > 0,98$, $f > 0,95$ et $\pi < 0,15$). Des rapports E/L supérieurs à 0,40 conduisent à une ségrégation des bétons pour chacun des indices ($f_u < 0,98$, $f < 0,95$ et $\pi > 0,15$). Les indices de ségrégation présentent une certaine fluctuation dans leurs évolutions pour le cas des bétons ségrégables, surtout en ce qui concerne les indices de stabilité au tamis et ceux de la colonne (fig. IV.5).

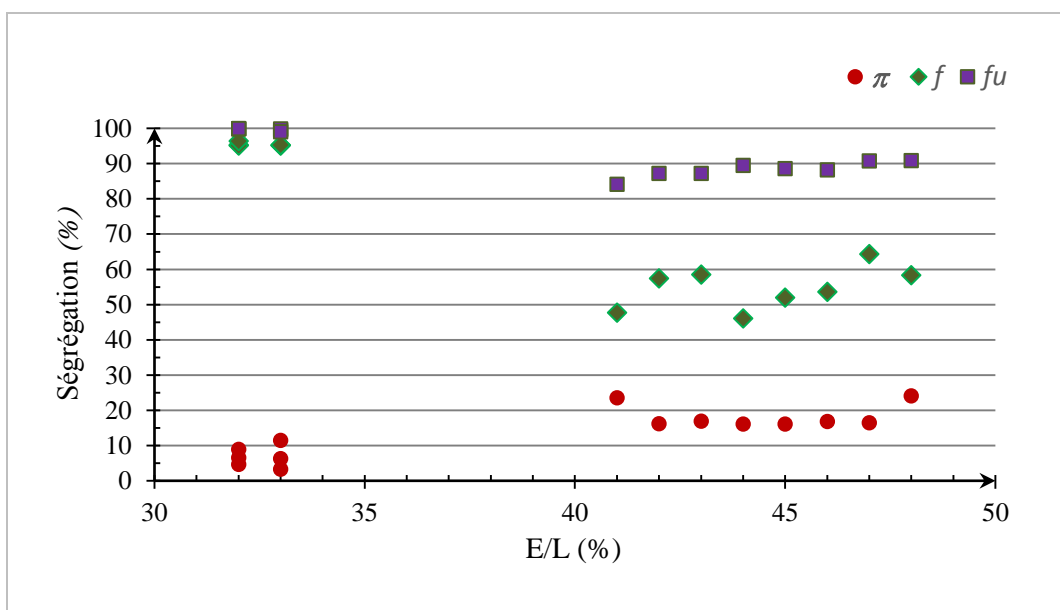


Figure IV.5- Evolution des indices de ségrégation (f_u , f et π) avec le rapport E/L.

La ségrégation est apparue dans les trois types d'essais avec des rapports E/L supérieurs à 0,32. Une diminution de ce dernier rapport de 19,51% (C8, C14) a provoqué une diminution des indices de ségrégation au tamis π de 51,33% et une augmentation de f et f_u respectivement de 99,79% et 17,71%.

IV.3.2- Effet de du rapport F/L

Les variations de l'étalement restent relativement faibles malgré l'augmentation de 20% du rapport F/L entre les bétons C9 et C14 (moins de 4% d'augmentation de l'étalement). Alors que des études ont établi que les fines calcaires augmentent l'ouvrabilité des BAP frais (Ghezal et al. 2002). Ceci est dû à la présence de dosages en super-plastifiant voisins. La présence des fillers aune

forte incidence sur la quantité de super-plastifiant pour un étalement donné (Hanaa, 2017). Les résultats de Zhu et Gibbs (Zhu, 2000) montrent que plus, il ya de fillers moins il faut de super-plastifiant pour atteindre un étalement donné. Même si les fillers calcaires améliorent l'ouvrabilité des bétons en modifiant la structure du squelette granulaire par amélioration de la capacité d'empilement des particules fines par un effet granulaire, l'effet du super-plastifiant a dominé dans notre cas (Figure IV.6-a).

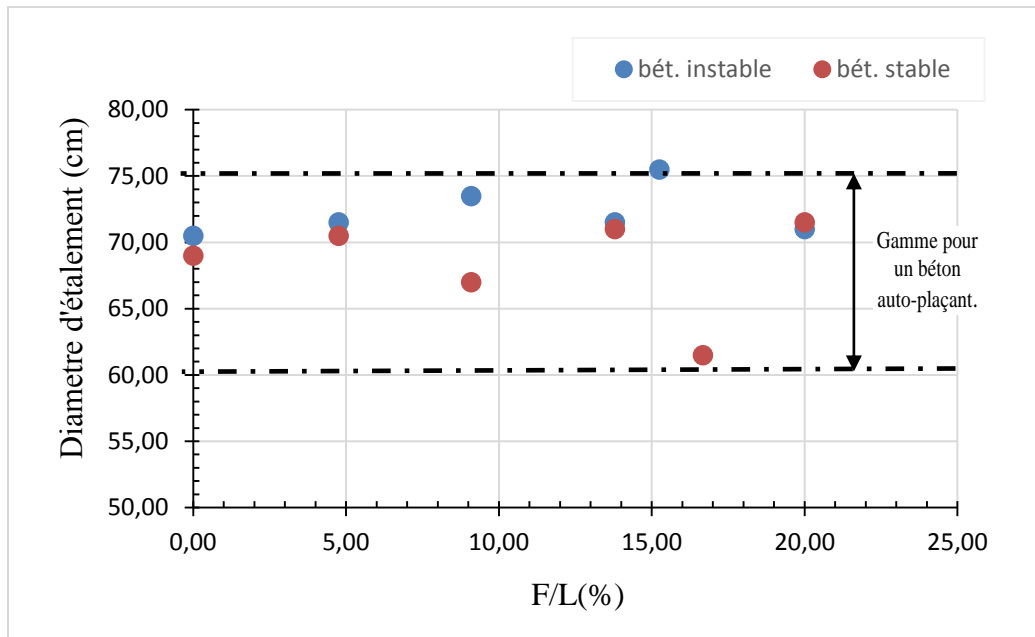


Figure IV.6-a. Evolution de l'étalement en fonction du rapport F/L.

La stabilité au tamis est meilleure pour des bétons contenant plus de fillers présentant des rapports SP/L et E/L voisins, aussi bien pour les bétons instables que les bétons stables. Il est observé la même tendance de variation de la stabilité au tamis pour les deux types de bétons. Une augmentation de F/L de 5% se traduit par une diminution de l'indice de stabilité au tamis π de 31% (C1 et C2) par exemple mais cette évolution présente une fluctuation (Figure IV.6-b).

On observe aussi que l'indice de ségrégation à la colonne f des bétons stables est moins sensible au rapport F/L que celui des bétons instables. Une augmentation de plus de 15 % de F/L n'a presque pas d'effet sur les bétons stables alors qu'elle provoque une diminution de cet indice de plus de 16 % pour les bétons instables. Mais la tendance d'évolution reste la même pour les deux types de béton (Figure IV.6-c).

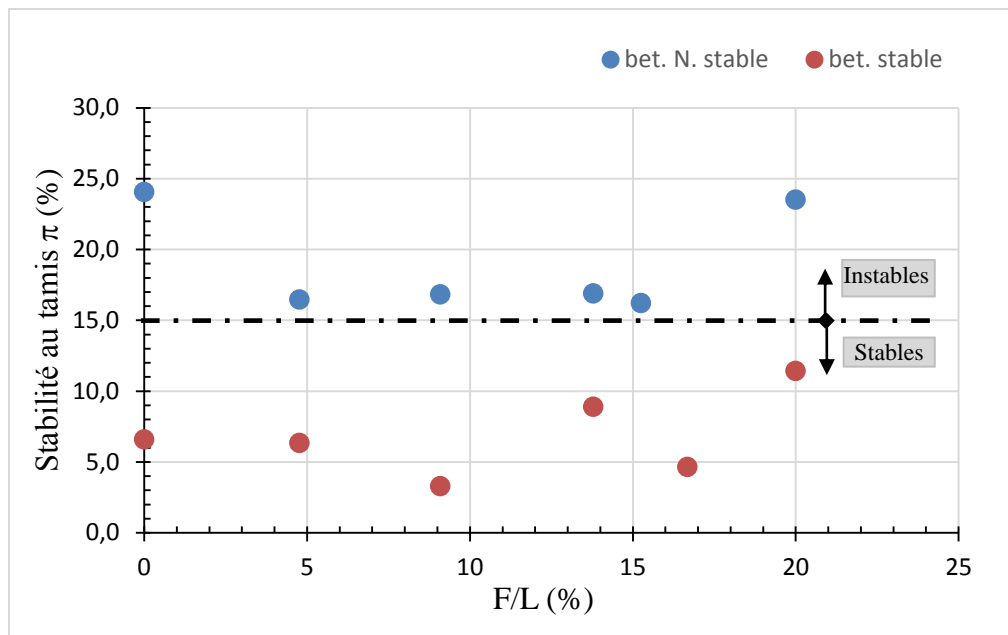


Figure IV.6-b. Evolution de l'indice de la stabilité au tamis en fonction du rapport F/L.

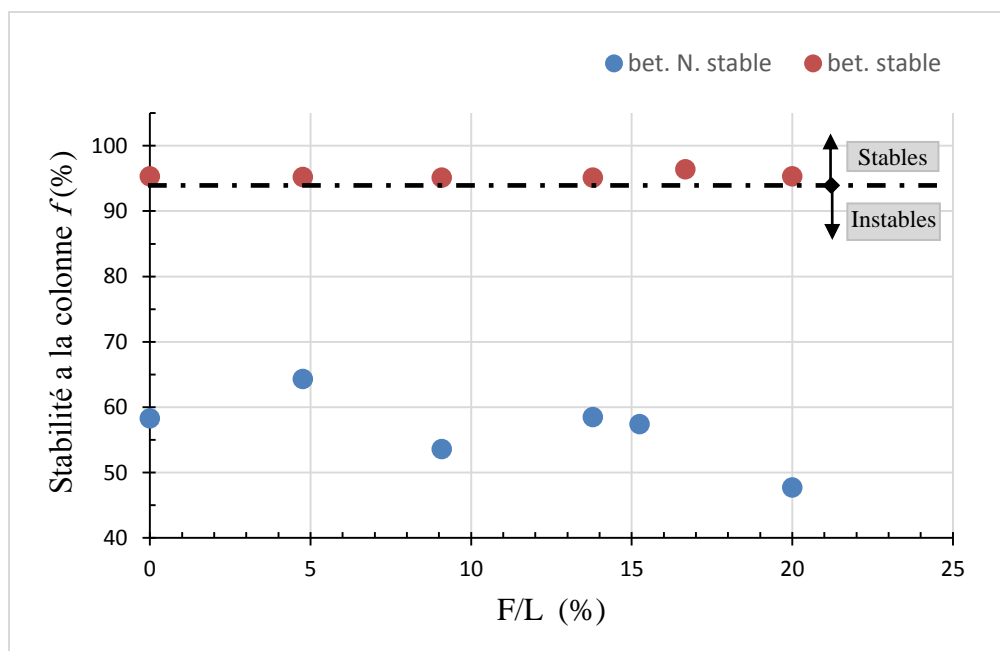


Figure IV.6-c. Evolution de l'indice de la stabilité à la colonne en fonction du rapport F/L.

L'indice ultrasonique de ségrégation f_u des bétons instables (C1 à C8) est plus sensible à la variation du rapport F/L (une diminution voisine de 7% de f_u pour une augmentation de 15% de F/L) que les bétons stables (C9 à C14), une

diminution de moins de 1 % de f_u pour la même augmentation du rapport F/L (Figure IV.6-d).

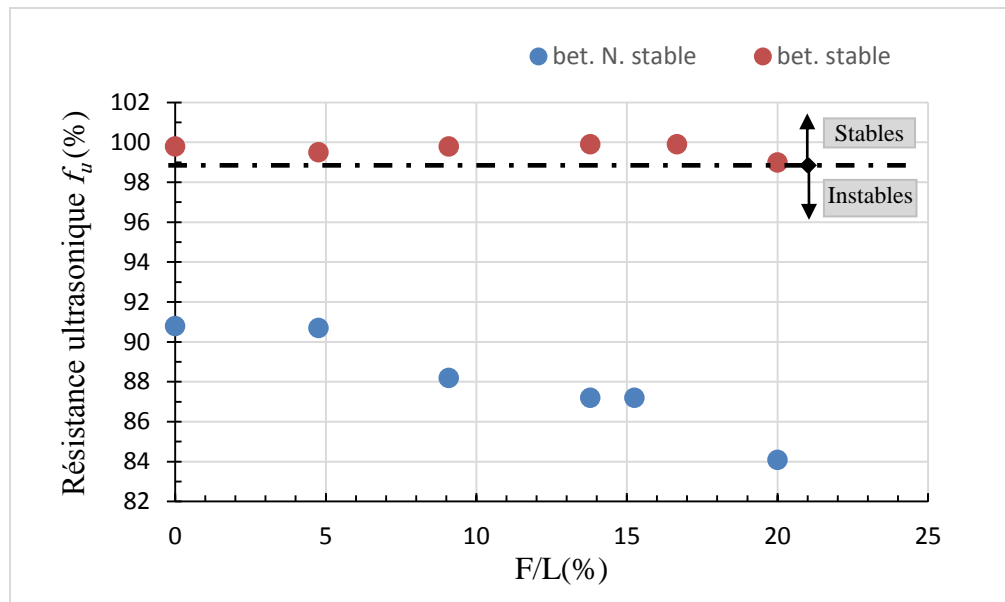


Figure IV.6-d. Evolution de l'indice ultrasonique de stabilité en fonction du rapport F/L .

La figure IV.7 montre l'évolution des trois indices de ségrégation (π , f et f_u) avec le rapport F/L pour les deux types bétons.

Le coefficient ultrasonique f_u est moins sensible à la variation de la quantité de fines dans le béton que l'indice de ségrégation à la colonne f , en particulier pour les bétons stables. En effet, les vitesses ultrasoniques ont été déterminées à travers le béton (mortier et gravier), alors que l'indice de ségrégation de résistance f ne concerne que le gravier.

Ces résultats confirment les résultats obtenus par Benaïcha (benaïcha et al. 2015) qui montrent que la vitesse des ultrasons reste presque constante lorsque la stabilité du tamis ne dépasse pas 20%. Au-delà de cette limite de stabilité, la vitesse des ultrasons varie de manière arbitraire. La vitesse des ultrasons semble être un indicateur sensible de la ségrégation. Une variation très minime de cette vitesse entre les parties indique la présence d'une ségrégation.

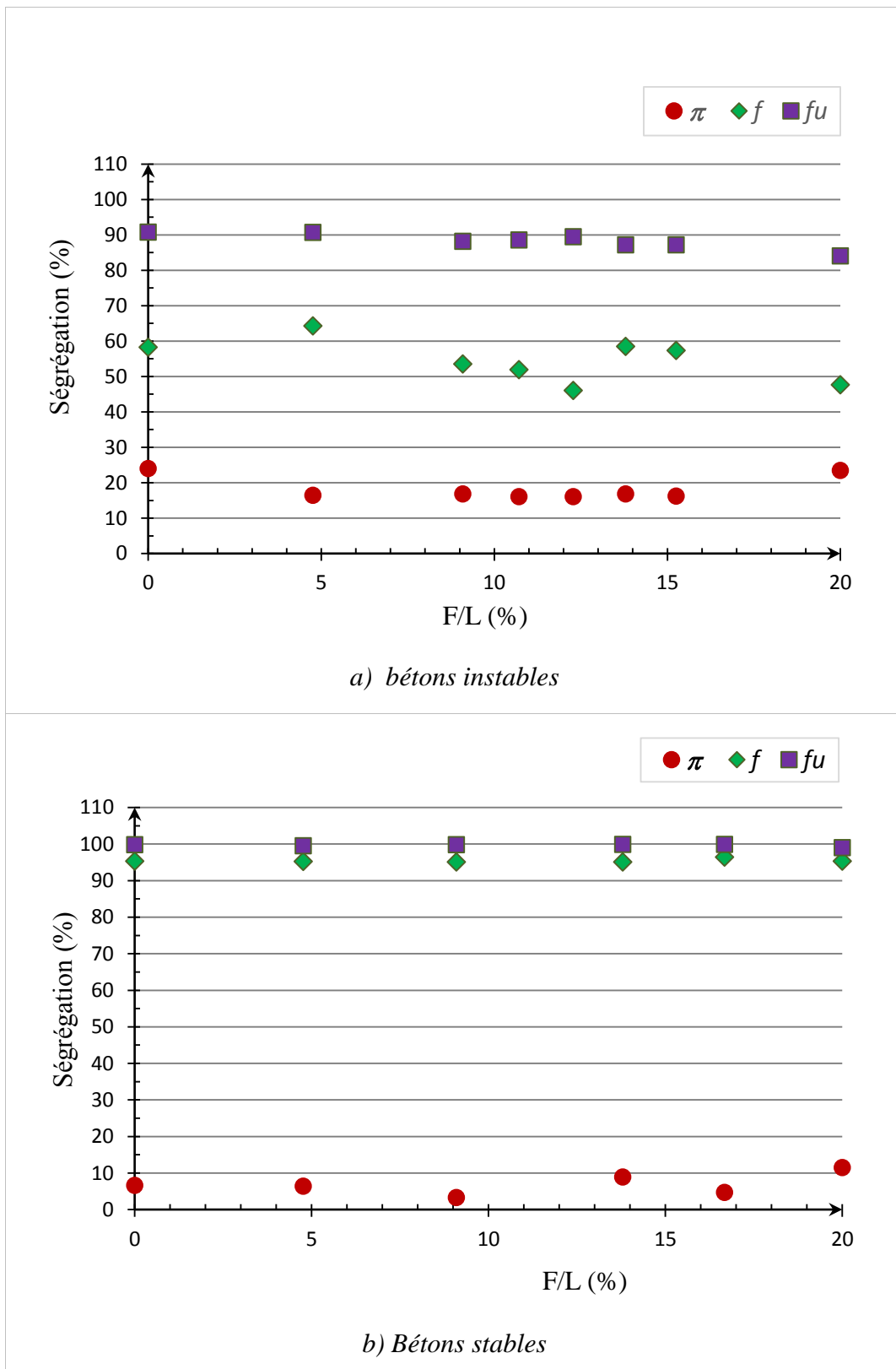


Figure IV.7- Evolution des indices de ségrégation (π , f et f_u) avec le rapport F/L.

IV.4- Relations entre l'étalement et les indices de ségrégation

Les figures (IV.8, a, b et c), présentent les variations du diamètre d'affaissement en fonction de la ségrégation obtenue par les trois types d'essais de la ségrégation pour tous les mélanges. On peut constater que l'augmentation du diamètre moyen d'affaissement des bétons instables par rapport aux bétons stables de 6,44%, a entraîné une augmentation moyenne de l'indice stabilité au tamis de 11,41% et des diminutions moyennes des indices de stabilité à la colonne et ultrasonique respectivement de 36,16% et 11,36%.

Donc, on ne peut avancer des relations bien définies entre l'étalement et les indices de ségrégation de nos bétons mais plutôt des tendances. La fluidité et la stabilité sont des propriétés apparemment contradictoires comme l'a noté Bethmont (Bethmont 2005). La formulation des compositions pour obtenir des bétons auto-plaçants est donc relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis.

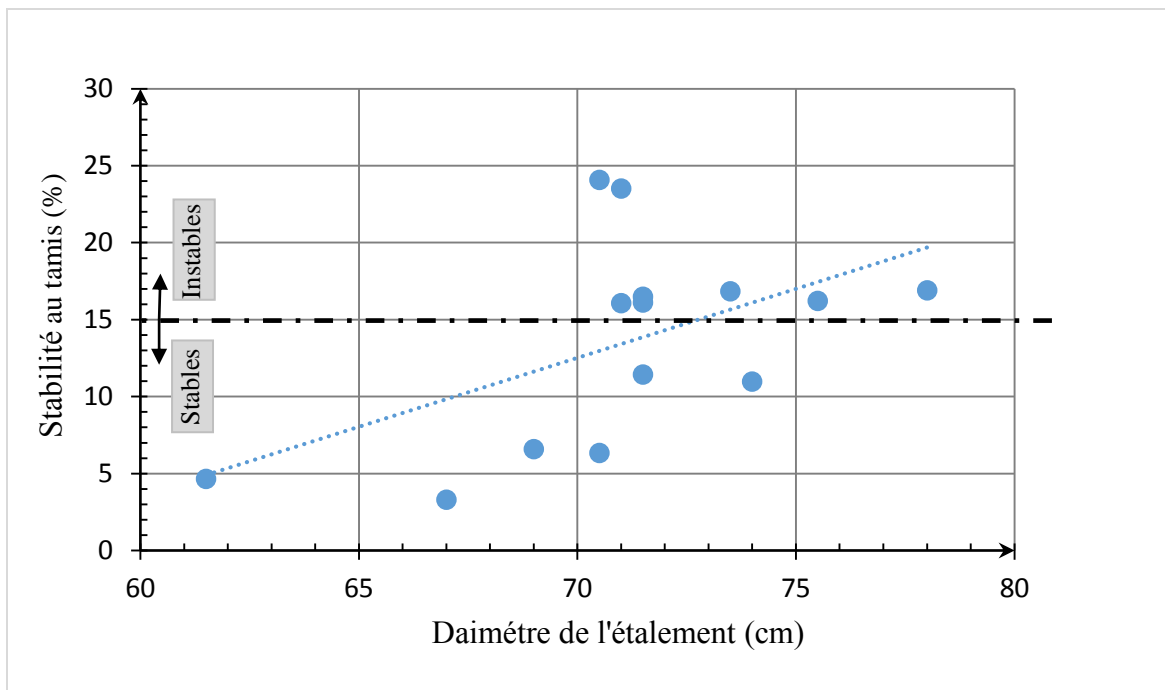


Figure IV.8-a. Evolution de l'indice de stabilité au tamis en fonction du diamètre de l'étalement.

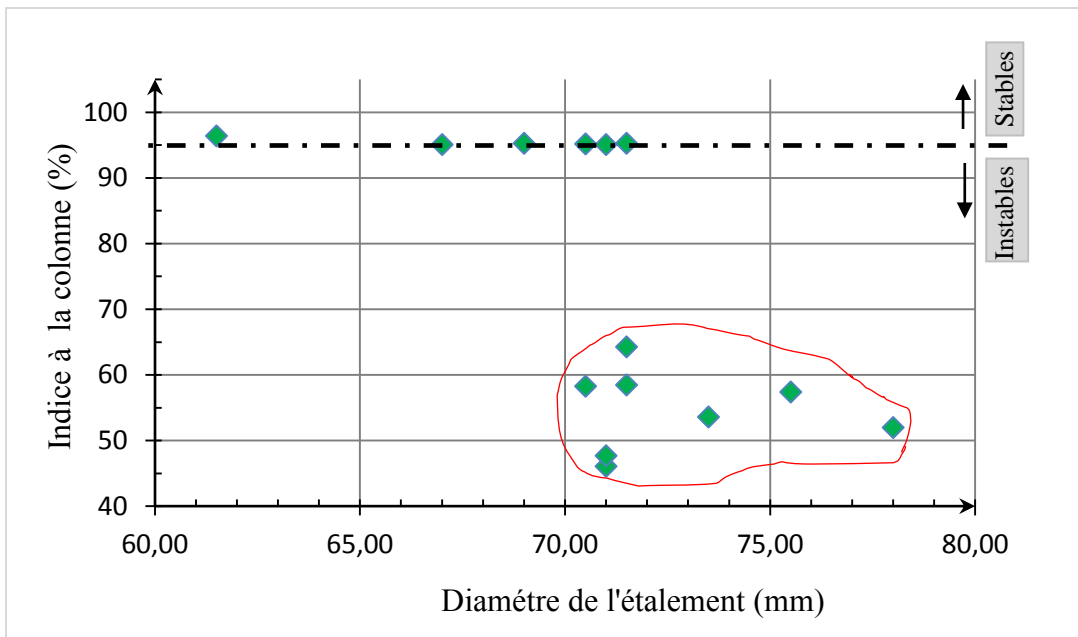


Figure IV.8-b. Evolution de l'indice de ségrégation à la colonne en fonction du diamètre de l'étalement.

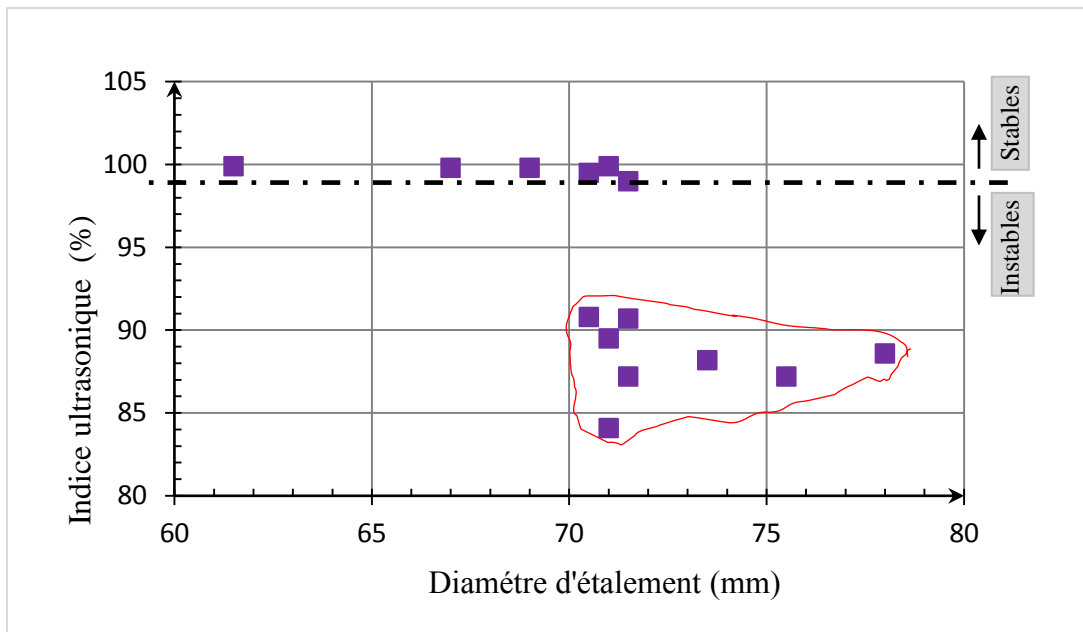


Figure IV.8-c. Evolution de l'indice ultrasonique de ségrégation en fonction du diamètre de l'étalement.

L'augmentation du diamètre d'affaissement en ajoutant plus de super-plastifiant ou d'eau a entraîné généralement une réduction de la résistance à la ségrégation mesurée par les trois essais de ségrégation. Ces variations dans ces relations ont aussi été rapportées par d'autres chercheurs (Cussih, 2003).

Les écarts types des résultats de chacun des trois essais de la ségrégation diffèrent d'un essai à un autre avec des valeurs plus importantes dans le cas des bétons instables comparativement aux bétons stables (fig. IV.9-a, b et d).

Les écarts types moyens du diamètre d'étalement sont respectivement 1.03%, 0.32% pour les bétons stables et les bétons instables. Ceux de l'indice de stabilité à la colonne sont 1,28% et 3,34%. Enfin, en ce qui concerne l'indice ultrasonique de ségrégation, on a 0,23% et 1,41%.

En général, pour tous les tests, les écarts types étaient plus élevés dans les bétons où la ségrégation était présente contrairement aux écarts types dans le cas des bétons stables

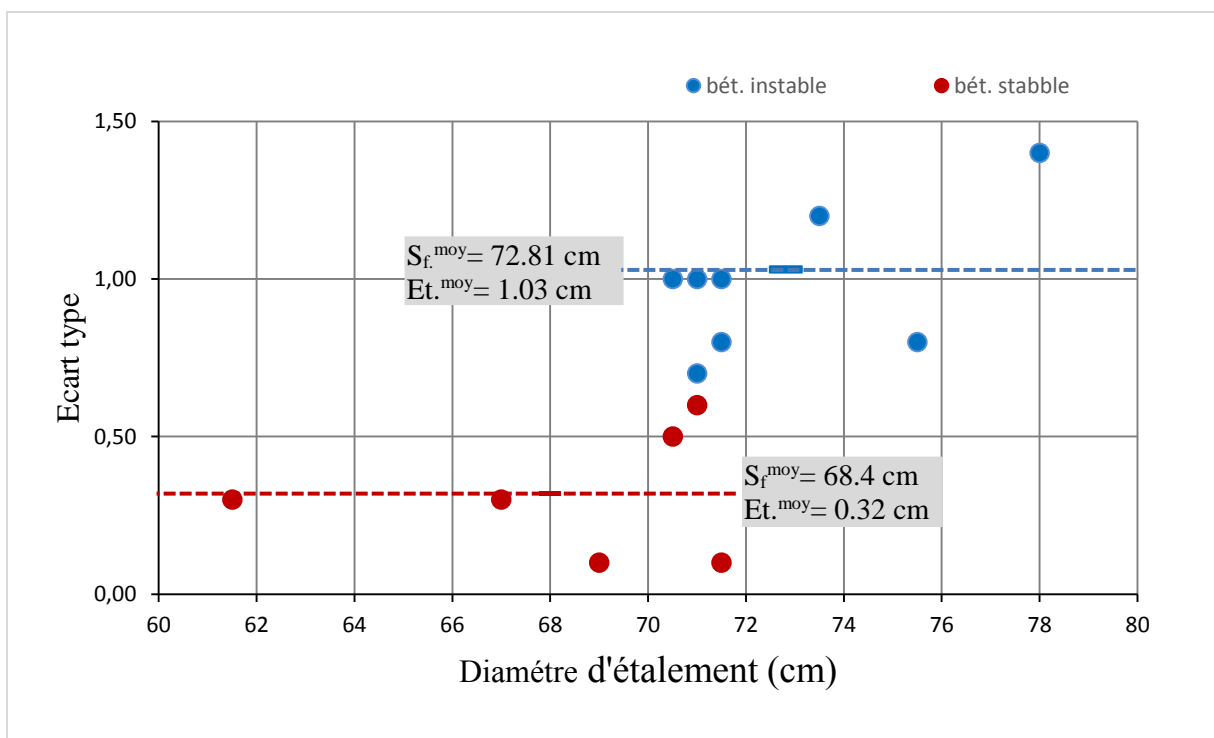


Figure IV.9-a. Relations entre l'écart type et les diamètres de l'étalement.

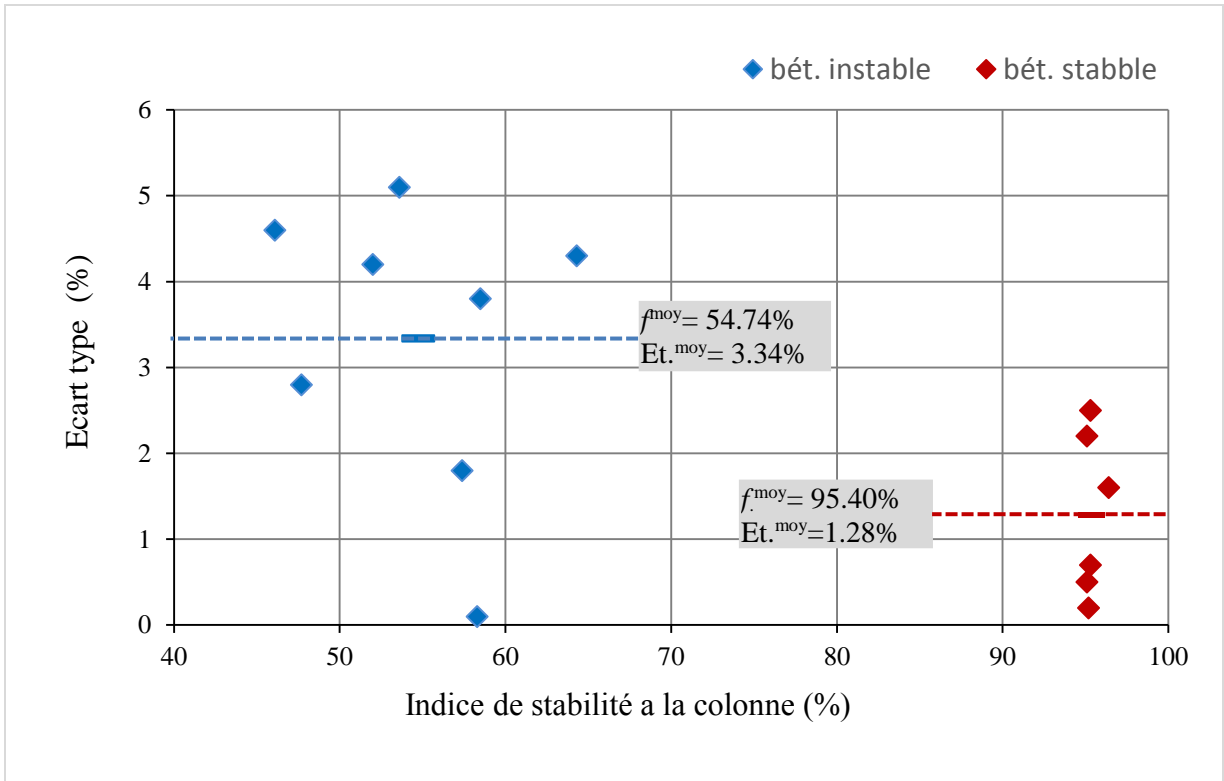


Figure IV.9-b. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité à la colonne

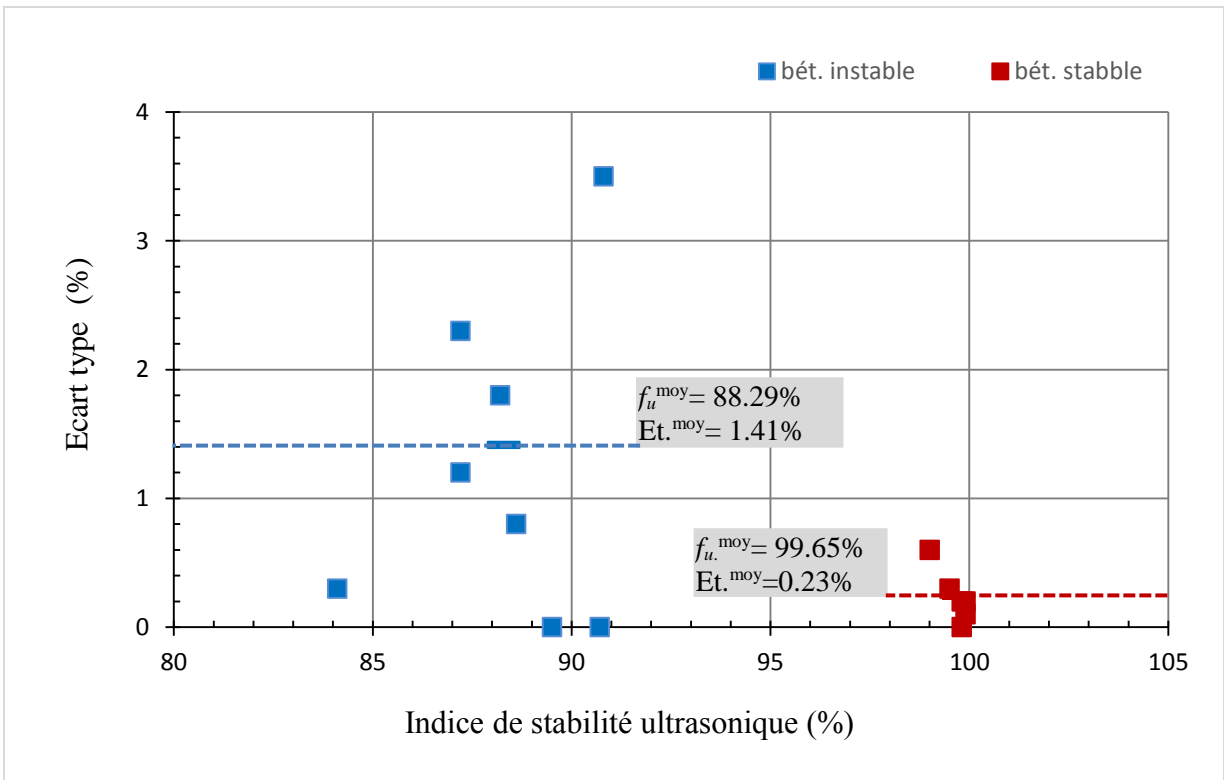


Figure IV.9-d. Relations entre l'écart type et la moyenne de l'indice de la stabilité ultrasonique

IV.5- Corrélations entre les différents indices de ségrégation des bétons

IV.5.1- Corrélations entre les indices au tamis et à la colonne

Les bétons stables (C9-C14) étaient ceux dont l'indice de ségrégation au tamis était inférieur à 15% (fig. IV.10). Tous ces bétons présentaient une différence de teneur en gros granulats déterminée par l'essai de stabilité à colonne f qui ne varie pas de plus de 5% par rapport à un béton complètement stable. Si on considère l'ensemble des bétons, la relation entre ces deux indices présente une certaine imprécision ($R^2 = 0.76$). Cette imprécision est due essentiellement aux bétons instables dont leur indice chute jusqu'à moins de 50% par rapport au béton idéal (0% de ségrégation).

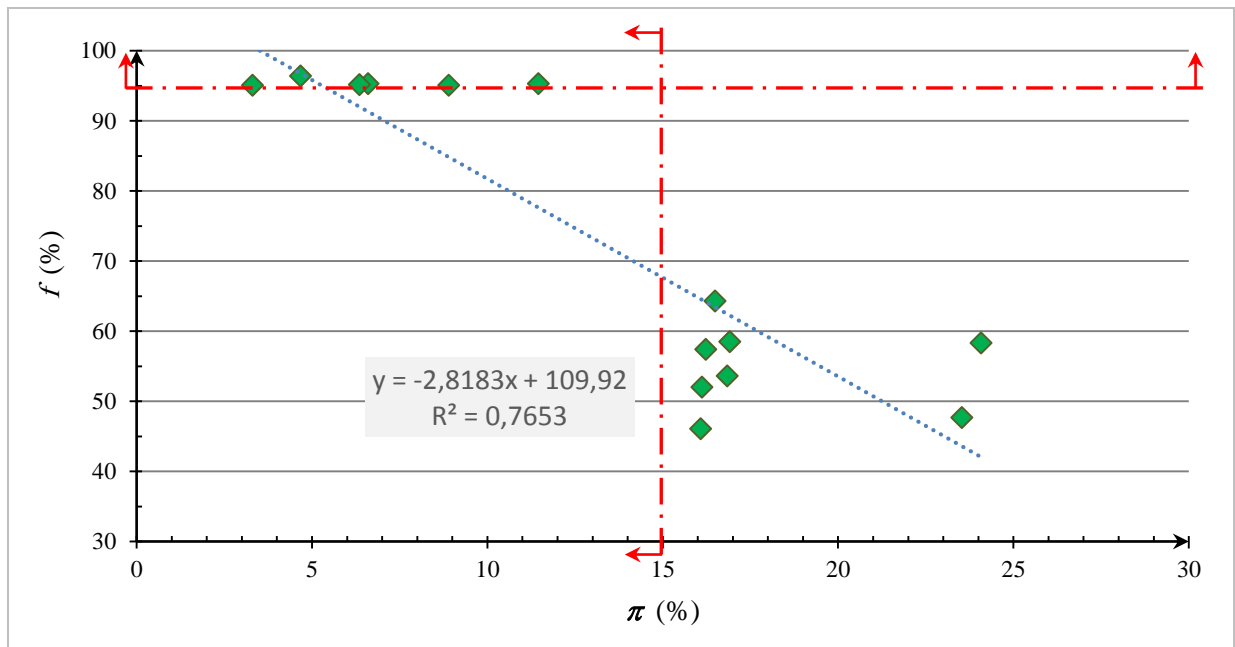


Figure IV.10. Relations entre les indices de stabilité au tamis (π) et de stabilité à la colonne (f)

IV.5.2- Corrélations entre les indices au tamis et ultrasonique

On peut avancer les mêmes remarques que précédemment, les bétons stables (C9-C14) présentent un indice ultrasonore de ségrégation f_u presque constant (moins de 2%) correspondant aux indices de ségrégation au tamis inférieurs à 15% (fig. IV.11). Quant aux bétons instables on a moins de perturbation, moins de 16 % par rapport à un béton idéal.

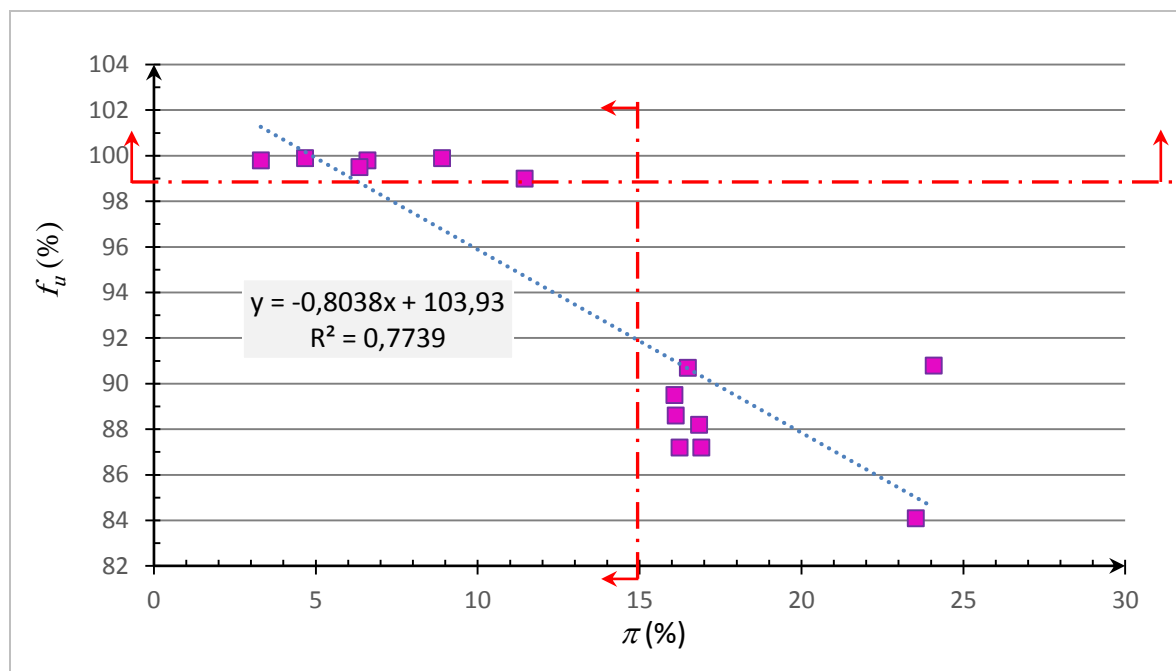


Figure IV.11- Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité au tamis (π)

IV.5.3- Corrélations entre les indices ultrasonique et à la colonne

La relation entre les indices ultrasonique de ségrégation et ceux à la colonne est beaucoup meilleure (fig. IV.12). Ceci est dû à la similitude des deux types d'essais qui sont réalisés à l'aide des mêmes corps d'épreuve (colonnes métalliques).

Finalement, les bétons stables (C9-C14) étaient ceux dont l'indice de ségrégation des tamis était inférieur à 15% (fig. IV.10, IV.11 et IV.12). Tous ces bétons présentaient un indice d'ultrasons f_u supérieur à 98%. Pour ces mélanges, lorsque la différence de teneur en gros granulats dans la colonne f ne varie pas de plus de 5%, l'indice ultrasonique de ségrégation f_u ne varie pas de plus de 2%. Pour les bétons instables ($\pi > 15$ %), les indices de ces deux dernières méthodes divergent en moyenne de plus de 35%. (Fig. IV.13).

Cette différence est due principalement au fait les essais ultrasoniques sont basés sur la transmission des ultrasons à travers le béton (gravier et mortier) alors les essais prennent en compte que la variation des masses du gravier.

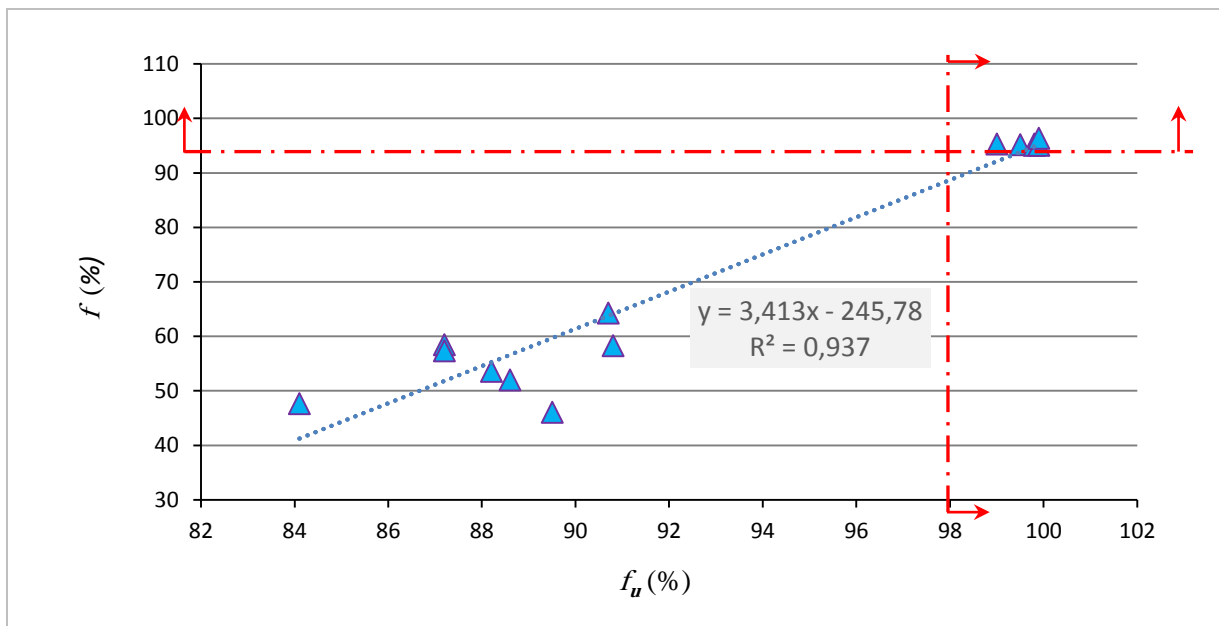


Figure IV.12- Relations entre les indices ultrasoniques de ségrégation (f_u) et de stabilité à la colonne (f).

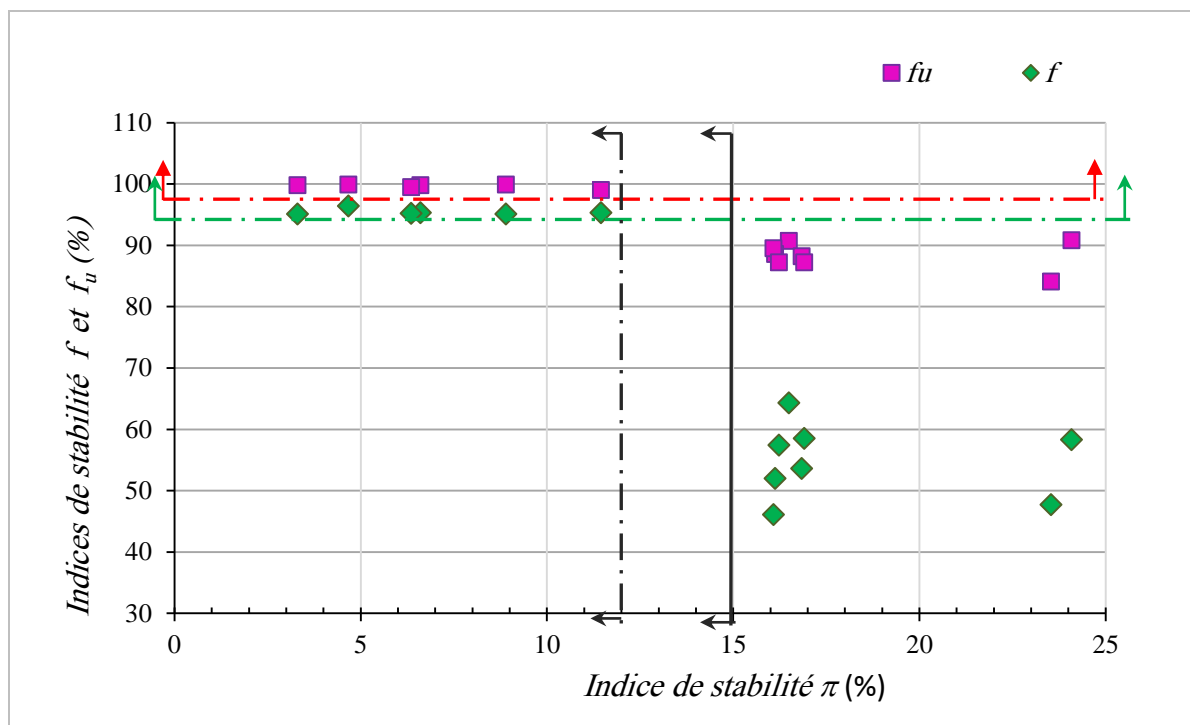


Figure IV.13- Relations entre l'indice de stabilité au tamis (π) et les indices de ségrégation à la colonne et ultrasonique (f, f_u)

IV.6- Conclusion

Dans cette étude expérimentale, une méthode ultrasonique a été testée pour diagnostiquer l'homogénéité du béton en termes de ségrégation. En considérant deux groupes de bétons (instables et stables), une diminution du rapport W/B conduit à une diminution de l'indice de stabilité au tamis π et à des augmentations distinctives des indices de ségrégation à la colonne et ultrasonique f et f_u . L'indice ultrasonique de ségrégation f_u s'est avéré moins sensible à la variation du taux de fillers calcaires utilisés, en particulier pour les mélanges instables, que l'indice de résistance à la ségrégation f . Comme prévu, la proportion d'eau était un facteur important de ségrégation pour le béton auto-plaçant. L'effet du rapport E/B a montré des résultats similaires. Ceci est dû au fait que les vitesses ultrasonores sont déterminées à travers la matrice cimentaire et les granulats (la vitesse d'impulsion dans le liant est inférieure à celle dans les granulats) alors que l'indice f concerne que la masse de graviers.

Les bétons stables (ceux ayant un indice de ségrégation au tamis inférieur à 15%) affichent tous un indice de résistance f supérieur à 95% et un indice ultrasonique f_u supérieur à 99%. Dans cette étude, les bétons stables étaient hautement identifiables des autres, quelles que soient les méthodes de mesure et les proportions d'eau utilisées, ils se sont manifestés par une constance des vitesses ultrasoniques. En tant que tel, la facilité d'utilisation de la méthode d'essai ultrasonique pour l'évaluation de la ségrégation du béton a été prouvée.

Cette étude a montré la possibilité de caractériser la ségrégation du béton avec une méthode ultrasonique, rapide et facile à utiliser. Un suivi de l'évolution de la ségrégation du béton dans le temps, de l'instant de coulage à sa prise, est donc possible avec cette méthode. De la sorte, on remplace deux méthodes de caractérisation de la ségrégation (aux états frais et durci) par une seule méthode.

Conclusion générale

...

Les propriétés des bétons frais, en premier lieu, a été revue à travers la description du mécanisme de l'hydratation du ciment et les conséquences physiques de l'hydratation sur la création d'un milieu poreux. La cohésion et la rigidité de la matrice solide sont procurées par l'augmentation des produits d'hydratation. La séparation des phases du béton engendre le phénomène de ségrégation dont sa caractérisation est effectuée par des essais traditionnels.

Et, en deuxième lieu, les notions d'excitation et de propagation des ondes ultrasonores et leurs applications dans la détermination de quelques propriétés des bétons ainsi que sur les caractéristiques et causes d'atténuation des signaux ultrasoniques et en fin l'application de la technique des ultrasons au cas du béton avec la sensibilité des ondes ultrasoniques à la granulométrie et la composition des bétons, a été revue.

L'étude expérimentale a été abordée, par l'exposition de la méthodologie expérimentale adoptée et la caractérisation des différents matériaux utilisés. Ainsi quatorze (14) compositions de bétons ont été soumises aux différents essais avec des variations des rapports E/L , S_p/L et F/L . La méthodologie expérimentale suivie s'articule principalement sur des mesures des indices de ségrégation et des mesures des vitesses des ultrasons (donnant des indices ultrasoniques de ségrégation).

Enfin, l'interprétation et l'exploitation des résultats expérimentaux réalisés a permet d'étudier divers relations, elles ont concernés l'évolution des vitesses ultrasoniques en fonction de divers paramètres tels que, les dosages en eau, en fillers et en superplastifiant ainsi et les corrélations entre ces vitesses (indices ultrasonores) et les autres indices de ségrégation.

Suite à ces travaux, nous avons mis au point une nouvelle méthode basée sur l'acquisition de la vitesse d'impulsion ultrasonore. Son avantage principal est la facilité de mise en œuvre, et la rapidité avec laquelle un grand nombre d'essais peuvent être faits. Elle pourra facilement s'étendre aux travaux de contrôle et vérification du phénomène de la ségrégation d'ouvrage existants en bétons.

La résistance à la ségrégation est affectée par la composition du mélange, le rapport E/L , le rapport F/L et le dosage du super-plastifiant. En isolant chacun de ces facteurs, il est possible de distinguer des tendances générales à savoir quel sera leur effet sur le diamètre d'étalement ou sur l'indice de ségrégation. Les

résultats des essais de stabilité au tamis et à la colonne (techniques classiques de mesure de la ségrégation) sont comparés aux résultats des essais non destructifs par la méthode ultrasonique proposée.

Cependant, ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres et la prédiction de la ségrégation devient relativement compliquée quand tous les facteurs sont considérés.

L'essai proposé, auscultation sonique avec mode de transmission direct, peut être utilisé pour vérifier la ségrégation du béton et contrôler sa qualité.

Sous la lumière des résultats des essais, que nous avons réalisés sur un ensemble de plus de 14 compositions différentes, les bétons dont les valeurs de l'indice de stabilité au tamis « π » est à 15% et l'indice de résistance à la colonne est « f » supérieure à 95% ne présentent pas de ségrégation et sont considérés comme stable de ce point de vue, avec une confirmation visuelle de cet aspect.

La mesure directe de la vitesse des ultrasons, permettant l'évaluation d'un indice ultrasonique de ségrégation « f_u ». Il est constaté que cet indice est supérieur à 98% pour les bétons jugés auparavant stables.

L'effet de la composition influence de manière significative le phénomène de ségrégation. Ce risque de ségrégation estimé à partir des trois essais, commence à devenir important quand le rapport E/L dépasse les 40%. L'apport des fillers calcaires jouent plutôt en faveur de la stabilité des bétons.

Le coefficient ultrasonique est moins sensible à la variation de la quantité de fines dans le béton que l'indice de ségrégation à la colonne f . La vitesse des ultrasons reste presque constante lorsque la stabilité du tamis est bonne.

Finalement, les bétons stables étaient ceux dont l'indice de ségrégation des tamis était inférieur à 15 %. Tous ces bétons présentaient un indice d'ultrasons f_u supérieur à 98%. Pour ces mélanges, lorsque la différence de teneur en gros granulats dans la colonne f ne varie pas de plus de 5%, l'indice ultrasonique de ségrégation f_u ne varie pas de plus de 2%. Pour les bétons instables ($\pi > 15$ %), les indices de ces deux dernières méthodes plus de différence.

Perspectives

Plusieurs études complémentaires doivent être poursuivies, afin de valider les résultats trouvés. On pense particulièrement à :

- Une étendue plus vaste des compositions des bétons et l'utilisation de la méthode des plans d'expérience vue la variété des paramètres de compositions E/L, F/L, Sp/L, nature des granulats,....).
- une étude de sensibilité de l'effet de la fréquence des transducteurs,
- un suivi ultrasonique de ce phénomène de ségrégation du moment du coulage du béton à sa prise. Ceci permettra d'obtenir l'évolution de la ségrégation dans le temps,
- une confrontation des résultats de cette méthode non destructive avec des mesures in-situ sur des ouvrages ayant présentés ce phénomène de ségrégation.



Table de références

[AFGC, 2002]	AFGC, (2002), Association française de Génie Civil, « Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires ».
[AFGC, 2000]	AFGC. (2000), Recommandations provisoires sur les bétons auto-plaçants, Documents Scientifiques et Techniques, French Association of Civil Engineering, 62 p.
[Aïtcin, 2001]	Aïtcin et al,(2001),« L'interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 233, pp 87-98.
[Ambroise,1999]	Ambroise J., Rols S., Péra J. (1999) "Self-leveling concrete –design and properties". <i>Concr. Sc. Eng.</i> , 1(3):140–147.
[ASTM. 2009]	ASTM, (2009), "ASTM C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete: American Society for Testing and materials, Standards 4, USA.
[ASTM. 2003]	ASTM, (2003),ASTM-C597-02. Standard test method for pulse velocity through concrete. Normalization de l'American Society of Testing Materials,
[Atapattu, 1995]	Atapattu et al. 1995, creeping sphere motion in Hershel-Bulkley fluids: flow field and drag, <i>Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics</i> , 59, pp. 245-265.
[Barcelo, 2001]	Barcelo L., (2001), "Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge", Thèse de doctorat, Cachan, ENS Cachan-LMT, 293p.
[Baron, 1982]	Baron, J. and Sauterey, (1982), 'Le béton hydraulique. Connaissance et pratique', Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 560.
[Bauchkar, 2014]	Bauchkar Sunil D. and Chore H.S. (2014) "Rheological properties of self-consolidating concrete with various mineral admixtures" <i>Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal Vol. 51(1)</i> , 1-13.
[Beaupre, 1994]	Beaupre D. (1994), "Rheology of High Performance Shotcrete", Ph.D. Thesis, University of British Columbia.
[Benaïcha, 2015]	Benaïcha M. and al. (2015), "Prediction of Self-Compacting Concrete homogeneity by ultrasonic velocity" <i>Alexandria Engineering Journal</i> 54, 1181–1191.
[Benboudjema, 2002]	Benboudjema, F., (2002), "Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations bi-axiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires", Thèse de doctorat, Marne la Vallée, Université de Marne-La-Vallée, UFR de Sciences et Technologies, 258 p.
[Benouis, 2011]	Benouis A. and Grini A. (2011) "Estimation of concrete's porosity by ultrasound", <i>S.D., Physics Procedia</i> , 21, 53-58.
[Bensebti, (2008)]	Bensebti S. (2008), "Essai de caractérisation expérimentale de la ségrégation verticale des bétons autoplaçants", Thèse de Doctorat, université de Constantine, Algérie.
[Bentz, 2000]	Bentz, D. P., (2000), 'A three-dimensional cement hydration and microstructure development modelling package. Version 2.0, NISTIR 6269, Gaithersburg, Maryland, NIST Building and Fire Research Laboratory US.
[Beris, 1985]	Beris et al.,1985, <i>Creeping Motion of a sphere through a Bingham plastic</i> , <i>Journal of Fluid Mechanics</i> , 158, pp. 219-244.
[Berryman, 1990]	Berryman J. G., 1990, Confirmation of biot's theory. <i>Appl. Phys. Lett.</i> , vol. 37, no. 4, pp. 382-385.
[Bethmont, 2005,]	Bethmont S., 2000, mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) -Etude expérimentale des interactions granulaires-, Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris France.
[Bian, 2009]	Bian H. (2009) Etude expérimentale de l'endommagement de BFUHP sous sollicitations physique, chimique et mécanique. Thèse de doctorant, l'INSA Rennes, 2009, 184 p.
[Biot, 1956]	Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: i. low-frequency range," <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> , vol. 28, pp. 168-178.
[Bissonnette, 1996]	Bissonnette, B., (1996) "Le fluage en traction un aspect important de la problématique des réparations minces en béton", PhD thesis, Québec, Université Laval, Faculté des sciences et de génie -Département de génie civil,
[Bissonnette, 2000]	Bissonnette, B., J. Marchand, J. P. Charron, A. Delagrave and L. Barcelo, (2000), 'Early Age Behavior of Cement-Based Materials, <i>Materials Science of Concrete VI</i> : 243-326.
[Bohlen, 2000]	Bohlen, T. Kugler S., Klein G., and Theilen F., 2004, 1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion. <i>Geophysics</i> , 69(2) :330–344.

[Bouhamou, 2008]	Bouhamou N. et al. (2008), l'Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplacant à l'état frais, Afrique SCIENCE, 04 (1) pp. 1 – 20
[Bourbie, 1986]	Bourbie T., Coussy O., and Zinszner B., 1986, Acoustique des milieux poreux. Ed. Technip.
[Bourbie, 1987]	Bourbié T., Coussy O., and Zinszner B., 1987, Acoustics of Porous Media. Technip, IFP.
[Bresson, 2005]	Bresson, A., (2005), "Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge", Maîtrise en Génie Civil, Laval University, Québec, 197 p.
[Breul, 2008]	Breul, P., Geoffray, J. M. and Haddani, Y. (2008), "On Site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis", Advanced Concrete Technology, 6 (1), 171-180.
[Briscoe, 1992]	Briscoe et al., 1992, <i>The falling of Spheres through Bingham Fluids</i> , Colloids and Surface, vol 65, pp 69-75.
[British, 2004]	British, (2004), Testing Concrete. Part 4. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity, Standards Institution BS EN 12504-4, London.
Brown, 1986]	Brown P., Harner C. and Prosen E., (1986), 'The effect of inorganic salts on tricalcium silicate hydration'. Cement and Concrete Research, 16(1) :17-22.
[BS, 1881]	BS 1881: Part 203 recommends minimum path lengths of 100mm and 150 mm for concrete with maximum aggregate sizes of 20 and 40 mm, respectively.
[Bullock, 1959]	Bullock, R.E. and Whitehurst, E.A. (1959), "Effect of certain variables on pulse velocities through concrete", Highway Res. Board Bull., 206, 37.
[Bury, 2002]	Bury, Christensen, (2002), "The role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete", Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 Novembre, Chicago, pp 141-146.
[Byfors, 1980]	Byfors J., (1980), "Plain concrete at early ages", these de doctorat, Swedish Cement and concrete Institute.
[Carlsward, 2003]	Carlsward et al., (2003), "Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete", Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
[Cawley, 1996]	Cawley P. and Alleyne D., 1996, the use of lamb waves for the long-range inspection of large structures. <i>Ultrasonic</i> , 34:287-290.
[Chaix, 2003]	Chaix J.F., 2003, Caractérisation non destructive de l'endommagement des bétons : Apport de la diffusion ultrasonore. PhD thesis, LCND, Université de la méditerranée, France.
[Chaix, 2006]	Chaix J.F., Garnier V., Corneloup, 2006, Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media: Theoretical analysis and experimental validation, <i>Ultrasonic</i> 44, p. 200-210.
[Chanvillard, 1999]	Chanvillard, G. (1999), 'Le matériau béton', connaissances générales, Lyon, ALEAS Editeur.
[Charron, 2003]	Charron, J. P., (2003), "Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte", PhD thesis, Université Laval, Département Génie Civil, Québec, 332 p.
[Chhabra, 2003]	Chhabra R.P. 1993, <i>Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids</i> , CRC Press, 417 pages.
[Coste, 2003]	Coste C. and Gilles B., 1999, On the validity of hertz law for granular material acoustics," <i>Eur. Phys. J. B.</i> , vol. 7, pp. 155-168.
[Coste, 1999]	Coste C. and Gilles B., 1999, On the validity of hertz law for granular material acoustics," <i>Eur. Phys. J. B.</i> , vol. 7, pp. 155-168.
[Coste, 1997]	Coste C., Falcon E., and Fauve S., 1997, Solitary waves in a chain of beads under hertz contact," <i>Phys. Rev. E.</i> , vol. 56, pp. 6104-6116.
[Coussy-a, 2004]	Coussy, O. (2004), 'Poro Mechanics', England, John Wiley & Sons.
[Coussy-b, 2004]	Coussy, O., P. Dangla, T. Lassabatere and V. Baroghel-Bouny, (2004), "The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials," <i>Materials and Structures</i> , 37, 265,15 -30,,
[Cussigh, 2003]	Cussigh, F. et al. (2003), "Project testing SCC-segregation test methods." In: Wallevik O., Nielsson I. (eds) <i>Self-Compacting Concrete</i> . Third international RILEM symposium on self-compacting concrete, Reykjavik. RILEM Publications SARL, Bagnaux, p 311.

[Cuxac, 1991]	Cuxac P., 1991. Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes. Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy.
[De Larrad, 1996]	De Larrard et al, (1996), « La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performance », Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n°202, pp 61-69.
[De Larrard, 1998]	De Larrard et al., (1998), "Fresh Concrete: A Hershel-Bulkley Material", Materials and Structures, vol 31, pp 494-498.
[De Larrard, 1999]	de Larrard, 1999, <i>Structures granulaires et formulation des bétons</i> , Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34. (Ouvrage original : F. DE LARRARD, "Concrete Mixture-Proportioning – A Scientific Approach", Modern Concrete Technology Series, No. 9, E & FN SPON, Londres.
[De Schutter, 2005]	De Schutter G., (2005), G.F.T.F.S.C.C., "Measurement of properties of fresh self-compacting concrete" Guidelines TESTING-SCC, 15-23. Ehttp://www.civeng.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC/.
[Digby, 1981]	Digby P. J., 1981, the effective elastic moduli of porous granular rocks," J. Appl. Mech., vol. 48, pp. 803-808.
[Duffy, 1957]	Duffy X. and Mindlin R. D., 1957, Stress-strain relation and vibrations of granular medium," J. Appl. Mech., vol. 24, pp. 585-593.
[Duran, 1997]	Duran J., 1997, Sables, poudres et grains. Paris : Eyrolles.
[Duran, 1993]	Duran J., Rajchenbach J., and Clément E.,1993, Arching effect model for particle size segregation," Phys. Rev. Lett., vol. 70, pp. 2431-2434.
[EFNARC, 2005]	EFNARC, 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production, and Use, UK: Association House, 2005.www.efnarc.org.
[Elvery, 1969]	Elvery, R.H., Din, N.M, 1969. Ultrasonic Inspection of Reinforced Concrete Flexural Members. Proc. Symp. On Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, Londres, Juin, p.23
[Emborg, 1999]	Emborg, (1999), "Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production", Proceedings of the 1 st international RILEM Symposium, Stockholm, pp95-105.
[NF EN, 2005]	NF EN 12504-4 , Mai 2005 :Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son – Afnor-
[EN, 2010]	EN 12350-11, 2010: European standard "Testing fresh concrete - Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test" ISBN 978 0 580 69215 4, ICS 91.100. 30.
[ENG, 2012]	Entreprise nationale des granulats " rapport d'analyse du laboratoire centralen° 84 du 02-08-2012, Algérie.
[Eslami, 2010]	Eslami J., 2010. Étude de l'endommagement à court et long terme d'une roche poreuse par méthodes acoustiquesN. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
[Feldman, 1968]	Feldman, R. F. and P. J. Sereda, (1968), "A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties," Matériaux et Constructions, 1, 6, 509-520.
[Ferraris, 1992]	Ferraris et Gaidis, (1992), "Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste", ACI Materials Journal, vol 88, n°4, pp 388-393.
[Ferraris, 1999]	Ferraris, (1999), "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol 104, n°5, pp461-478.
[Ferraris, 1998]	Ferraris, de Larrard, (1998), "Testing and modeling of fresh concrete technology", NIST, NISTIR 6094.
[Ferraris, 2001]	Ferraris, Obla et Hill, (2001), "Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete", Cement and concrete research, vol 31, pp245-255.
[Ferroir, 2004]	Ferroir, Huynh, Coussot, 2004, <i>Motion of solid object trough a (thixotropic) paste</i> , Physics of fluid, vol 16, pp 594-601.
[Fethi, 2007]	Fethi Soltani, Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, 2007, Etude expérimentale de la propagation de l'onde de surface dans un milieu poreux sec et saturé, LML UMR CNRS 8107, Ecole centrale de Lille, IEMN DDOAE UMR CNR 8520, Ecole centrale de Lille. Villeneuve d'Ascq, France.
[Flatt, 2001]	Flatt et Houst, (2001), "A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizer", Cement and Concrete Research, vol 31, pp 1169-1176.
[Flatt, 2004]	Flatt, (2004), "Toward a prediction of superplasticized concrete rheology", Materials and structures, vol 37, pp 289-300.
[Folliot, 1982]	Folliot, A. and M. Buil, (1982), 'La structuration progressive de la pierre de ciment', In Le béton hydraulique -Connaissance et pratique, J. Baron and R. Sauterey, Presse de l'ENPC, Paris.

[Fortin, 2005]	Fortin J., 2005. Compaction homogène et compaction localisée des roches poreuses. Étude expérimentale et théorique. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure.
[Fukuhara, 1981]	Fukuhara M., Goto S., Asaga K., Daimon M. et Kondo R., (1981), 'Mechanisms and kinetics of c4af hydration with gypsum', <i>Cement and Concrete Research</i> , 11:407–414.
[Garnier, 2012]	Garnier V., 2012. Ultrasounds through transmission. <i>Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques</i> . Breyse D., ed. RILEM, Springer books, p. 17-27.
[Garnier, 2005]	Garnier V., Abraham O., Dondonné E., Marlot D., 2005, Méthodes d'évaluation non destructive par propagation d'ondes mécaniques. Guide méthodologique de l'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé. Breyse D. et Abraham O., Presses ENPC, Paris, p. 201-234.
[Ghafoori, 2010]	Ghafoori, N. and Diawara, H. (2010), "Evaluation of fresh properties of self-consolidating concrete under long transportation time and extreme temperature", <i>Proceeding of SCC 2010, Design, Production and Placement of Self-consolidation concrete</i> (Ed. by Khayat, K.H. and Feys, D.), Canada, 139-152.
[Ghezal, 2010]	Ghezal.A, Khayat.KH., "Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods", <i>ACI Mater</i> , J.99(3) pp. 264-272
[Gibson, 2005]	Gibson A. and Popovers, 2005, Lamb waves basis for impact-echo method analysis. <i>J. Engrg. Mech.</i> , 131(4) :438–443.
[Gilles, 2003]	Gilles B. and Coste C., 2003, Low-frequency behavior of beads constrained on a lattice," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 90, no. 17, p. 174302.
[Golaszewski, 2004]	Golaszewski, Swabowski, (2004), "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars", <i>Cement and Concrete Research</i> , vol 34, pp 235-248.
[Grzeszczyk, 2004]	Grzeszczyk S. and Podkowa P. (2004), "Effect of micro filler on the properties of self-compacting concrete mixture", <i>XIX Conference JADWISIN 2004, Concrete and prefabrication</i> , 257-262.
[Guoxuan, 2011]	Guoxuan, X., Min, D., Haiqing, H. and Mingshu, T. (2011), "Absorbing and mechanical properties of cement-based composites with nano-titanic oxide absorbent", <i>Adv. Mater. Res.</i> , 177, 558-561.
[Hanaa ,2017]	Hanaa F., (2017), Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplçants exposés à une température élevée, Doctorat de l'Université de Cergy Pontoise.
[Hamidian, 2012]	Hamidian M., et al. (2012), "Application of Schmidt rebound hammer and ultrasonic pulse velocity techniques for structural health monitoring" <i>Scientific Research and Essays</i> , 7(21), pp. 1997-2001.
[Hasni, 1999]	Hasni L., Bétons Autoplçants, Synthèse Bibliographique Rapport de Recherche N°. 98-004 /98-006, CEBTP, Juillet 1999.
[Hansen, 1986]	Hansen, T. C., (1986), "Physical structure of hardened cement paste. A classical approach," <i>Materials and Structures</i> , 19, 114,423-436, 1986]
[Hattori, 1979]	Hattori, K., 1979, "Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan," <i>Superplasticizers in Concrete</i> , SP-62, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 37-66.
[He, 2001]	He, Laskowski, Klein, 2001, <i>Particle movement in non-Newtonian slurries: the effect of yield stress on dense medium separation</i> , <i>Chemical Engineering Science</i> , 56, pp. 2991-2998.
[Hernandez, 2016]	Hernandez L., Margarita A., (2016), "Influence of mix design parameters on dynamic segregation of self-consolidating concrete and consequences on performance of precast beams", <i>Masters Theses</i> , 7557. Missouri university of science and technology master of science in civil engineering. http://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7557
[Hertz, 1882]	Hertz H., 1882, <i>Über die ber uhrung fester elastische korper</i> , "J. reiner und angewandte Mathematik", vol. 92, pp. 156-171.
[Hill, 1980]	Hill T. and Knopo L., 1980, Propagation of shock waves in one-dimensional crystal lattices," <i>J. Geophys. Res.</i> , vol. 85, pp. 7025-7030.
[Hostler, 2005]	Hostler S. R. and Brennen C. E., 2005, Pressure wave propagation in a granular bed," <i>Phys. Rev. E</i> , vol. 72, pp. 031303 (1-13).
[Hsu, 1999]	Hsu et al., (1999), "Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability", <i>cement and concrete composites</i> , vol 21, pp 425-430.
[http.pdf, 2016]	http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf (consulted 07-2016)
[Hu, 1995]	Hu, (1995), « Rhéologie des Bétons fluides », études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 20.

[Hua, 1995]	Hua, C, 1995. Analyses et modélisations du retrait d'auto dessiccation de la pâte de ciment durcissante, LCPC OA 15 - Issu du rapport de thèse de l'ENPC, Paris
[Huet, 1982]	Huet C., (1982) Propriétés acoustiques in 'Le béton hydraulique', Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées Paris, pp. 423-52.
[Husson, 1991]	Husson, S. 1991. <i>Etude physicochimique et mécanique des interactions ciment-filler, Application aux mortiers</i> . Thèse doctorat, INIST-CNRS, Cote INIST : T 82906.
[IAEA, 2002]	IAEA, (2002), "Training Course Series 17: "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures", Vienna. pp 100-111.
[Igarashi, 2003]	Igarashi I., Bentur A. et Kovler K., (2003), Autogenous shrinkage and induced restrainings tresses in high-strength concretes. <i>Cement and Concrete Research</i> , 30:1701-1707.
[Iida, 1939]	Iida K., 1939, Velocity of elastic waves in a granular substance," <i>Bull. Earth. Res. Int.</i> , vol. 17, pp. 783-808.
[Irrigaray, 2016]	Irrigaray M. A. P., Pinto R. C. de A., Padaratz I. J. (2016), "A new approach to estimate compressive strength of concrete by the UPV method", <i>Rev. IBRACON Estrut. Mater.</i> vol.9 no.3 São Paulo.
[ISO, 2004]	ISO, (2004), ISO1920-7, Testing of concrete - Part 7: Nondestructive tests on hardened concrete, published by ISO.
[Jacobs, 2000]	Jacobs L.J. and Owino J.O., 2000, Effect of aggregate size on attenuation of rayleigh surface waves in cement-based materials. <i>J. Eng. Mech. - ASCE</i> , 126(11) :1124-1130.
[Jacques, 2012]	Jacques D.F., 2012. Contrôle non destructif (CND). Dossier Techniques de l'Ingénieur.
[Jaeger, 1996]	Jaeger H. M., Nagel S. R., and Behringer R. P., 1996, Granular solids, liquids, and gases," <i>Rev. Mod. Phys.</i> , vol. 68, no. 4, pp. 1259-1273.
[Jean, 2012]	Jean-Pierre Lefebvre et al. 2012. L'acoustique ultrasonore et ses applications, 1 ^{re} partie. Laboratoire de mécanique et d'acoustique UPR CNRS 7051.
[Jérôme, 2011]	Jérôme L., 2011, Etude d'un matériau granulaire sec par ondes ultrasonores : effet non linéaire, atténuation et diffusion, thèse de Doctorat, Université Paris-Est.
[Jia, 2009]	Jia X P, Laurent J, Khidas Y, et al. 2009, Sound scattering in dense granular media. <i>Chinese Sci Bull</i> , 54: 4327-4336
[Jia, 1999]	Jia X., Caroli C., and Velicky B., 1999, Ultrasound propagation in externally stressed granular media," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 82, pp. 1863-1866.
[Jiang, 1995]	Jiang S., Mutin J. et Nonat A., (1995), 'Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of cement setting. i. the fundamental processes involved during the cement setting', <i>Cement and Concrete Research</i> , 25(4):779-789.
[Jin, 2002]	Jin, (2002), « Properties of mortar for self-compacting concrete », PhD thesis de l'Université de Londres, 398 pages.
[Job, 2005]	Job S., Melo F., Sokolow A., and Surajit S., 2005, How hertzian solitary waves interact with boundaries in a 1d granular medium," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 94, no. 17, p. 178002.
[Job, 2014]	Job T. and Harilal B. (2014) "Fresh and hardened properties of concrete containing cold bonded aggregates" <i>Advances in Concrete Construction</i> , 2 (2), 77-89.
[Johnson, 1982]	Johnson D. L. and Plona T. J., 1982, Acoustic slow waves and the consolidation transition, <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> , vol. 72, pp. 556-565.
[Johnson, 2003]	Johnson D. L., Plona T. J., Scala C., Pasierb F., and Kojima H., 1982, Tortuosity and acoustic slow waves," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 49, pp. 1840-1844.
[Johnson, 4985]	Johnson K. L., 1985, <i>Contact Mechanics</i> . Cambridge : Cambridge Univ. Press.
[Jolicoeur, 1998]	Jolicoeur et Simard, (1998), « Chemical admixture-Cement interactions : Phenomenology and physico-chemical concepts », <i>Cement and Concrete Research</i> , vol 20, pp 87-101.
[Jones, 1962]	Jones, R. (1962), <i>Non-Destructive Testing of Concrete</i> , Cambridge University Press, London.
[Kaplan, 1959]	Kaplan, M.F. (1959), "the effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete", <i>Mag Conc Res</i> , 11(32), 85.
[Khayat, 1999]	Khayat, (1999), "Workability, Testing and performance of self-compacting concrete", <i>ACI Materials Journal</i> , vol 96, n°3.
[Khayat, 1997]	Khayat. H.K. and Guizani. Z. (1997), "Use of viscosity-modifying admixtures en enhance stability of fluid concrete", <i>ACI Mater. J.</i> 94 (4) 332-340.

[Klur, 1996]	Klur I., (1996), 'Etude par RMN de la Structure des Silicates de Calcium Hydratés', Thèse de doctorat, Université Paris.
[Kumavat, 2014]	Kumavat H. R., Tapkire G., Patil P. S., Chitte C. J., (2014) "Condition assessment of concrete with ndt International Journal of Research in Engineering and Technology e ISSN: 2319-1163 p ISSN: 2321-7308, JUNE.
[Lachemi, 2003]	Lachemi M., Mesbah H., Petroov N. et Ait P., (2000), CIN: Minimizing autogenous shrinkage and early age cracking in high performance concrete structures,
[Lamb, 1904]	Lamb H., 1904, on the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. <i>Phil. Trans. Roy.Soc. London</i> , 203:1–42.
[Landau, 1970]	Landau L. and Lifshitz E., 1970, Théorie de l'élasticité - Tome 7, Oxford : 2nd edition, Pergamon press.
[Landis, 1995]	Landis E.N. and Shah S.P., 1995, Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials. <i>J. Eng. Mech. - ASCE</i> , 121(6) :737–743.
[Langenberg, 1995]	Langenberg K. and al, 1995. Electromagnetic and elastic wave scattering and inverse scattering applied to concrete, International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) Berlin, pp. 713-720.
[Lazaridi, 1985]	Lazaridi A. N. and Nesterenko V. F., 1985, Observation of a new type of solitary waves in a one dimensional," <i>J. Appl. Mech. Technol. Phys.</i> , vol. 26, pp. 405-408.
[Le Chatelier, 1904]	Le Chatelier H., (1904), 'la Constitution des Mortiers Hydrauliques', Recherches Expérimentales.
[Legrand, 1971]	Legrand C., (1971), « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
[Li, 2011]	Li, B., Duan, Y., Zhang, Y. and Liu, S. (2011), "Electromagnetic wave absorption properties of cement-based composites filled with porous materials", <i>Mater Design</i> , 32(5), 3017-3020.
[Li, 2013]	Li, L., Kwan, G. and Kh, A. (2013), "Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness", <i>Cement and Concrete Composite</i> , V.39, 33–42.
[Liu-b, 1993]	Liu C. H. and Nagel S. R., 1993, Sound in granular material: disorder and nonlinearity," <i>Phys. Rev. B.</i> , vol. 48, no. 21, pp. 15646-15650.
[Liu-a, 1992]	Liu C. H. and Nagel, S. R., 1992, Sound in sand," <i>Phys. Rev. Lett.</i> , vol. 68, no. 15, pp. 2301-2304.
[Love. 1911]	Love. A. E. H., 1911, <i>Some Problems of Geodynamics</i> . Cambridge University Press, Cambridge.
[Lowke, 2003]	Lowke A. et al. (2003), a simple and significant segregation test for SCC, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande.
[Lozev, 1996]	Lozev, M.G., Lane, D.S. ; Clemena. G.G. ; Nakleh, N.J., (1996). Nondestructive Evaluation of Concrete Consolidation Using a Pulsed Ultrasonic Interferometer. <i>Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials</i> , pp. 39-54.]
[Makse, 2004]	Makse, H. A., Gland N., Johnson D. L., and Schwartz L., 2004, Granular packing: nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics," <i>Phys. Rev. E.</i> , vol. 70, p. 061302(19).
[Malhotra, 1991]	Malhotra, V.M., Carino, N.J. (1991), "Handbook on Non Destructive Testing of Concrete", CRC Press LLC.
[Mansoutre, 2000]	Mansoutre, (2000), « Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés », thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 132 pages.
[Marc, 2007]	Marc Goueygou, Fethi soltani, Zoubeir Lafhaj, Bogdan Piwakowski, Pawel Safiniwski, Jean-paul Balayssac, 2007, relation entre la vitesse ultrasonore et la porosité dans le mortier et le béton, Groupe électrique-acoustique, IEMN DDOAE UMR CNR 8520, Ecole centrale de Lille.
[Marchand, 2005]	Marchand, J., (2005), 'Cours de Durabilité du béton', 6ème cycle, Université Laval, Québec, Canada.
[Marie, 2006]	Marie-Aude P., 2006. Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable auténitique. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
[McHenry, 1967]	McHenry, D., Oleson, C.C., 1967. Pulse Velocity Measurement on Concrete Dams. <i>Trans. 9th Int. Congr. On Large Dams. Istanbul</i> , Q34, R5, V.3, 73.
[Mesbah, 2011]	Mesbah, H.A., Yahia, A. and Khayat, K.H. (2011), "Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete", <i>Cement and Concrete Research</i> 41 451–458.

[Mitani, 2003]	Mitani H., (2003.), 'Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux', Thèse de doctorat, ENPC 'Ecole nationale des ponts et chaussées.
[Mounanga, 2004]	Mounanga, P., A. Khelidj, A. Loukili and V. Baroghel-Bouny, (2004), "Predicting Ca (OH) 2 content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach," <i>Cement and Concrete Research</i> , 34, 255-265.
[Nachbaur, 2001]	Nachbaur L., Muti J., Nonat A. et Choplin L.(2001), 'Dynamic mode rheology of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting', <i>Cement and Concrete Research</i> , 31(2):183–192.
[Naik, 1991]	Naik, T. R., Malhotra, V. M. (1991) "Chapter 7: the ultrasonic pulse velocity method, in: V.M. Malhotra, N.J. Carino, (Eds.), <i>CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete</i> , CRC Press, 1991, pp. 169–188.
[Nakamura, 1999]	Nakamura, Ogawa, (1999), "Influence of interaction between sand and superplasticizer on the fluidity of concrete", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 21, pp 15- 20.
[Nehdi, 2004]	Nehdi et Rahman, (2004), "Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological model for different test geometry, gap, and surface friction", <i>Cement and concrete research</i> , vol 34, pp 1993-2007.
[Nesterenko, 1983]	Nesterenko V. F., 1983, Propagation of nonlinear compression pulses in granular media," <i>J. Appl. Mech. Technol. Phys. (USSR)</i> , vol. 24(5), pp. 733-743.
[Neville, 2000]	Neville, A. M. (2000), 'Propriétés des bétons, Paris, Eyrolles, 810 p.
[NF EN, 2007]	NF EN 13791: 2007 Assessment of concrete compressive strength in structures or in precast concrete products.
[NF-EN, 2005]	NF-EN-12504-4. Essais pour les bétons dans les structures - partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son. Normes Française, AFNOR, 2005.
[Nist, 2001]	Nist, (2001), "Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC", Nantes, France, NIST 6819, 147 pages.
[Nonat, 1992]	Nonat A. et J. Mutin, (1992), 'Hydration and setting of cements', E&F Spon, London.
[Nonat, 1994]	Nonat, A. 1994. Interaction between chemical evolution and physical evolution, in the case of tricalcium silicate. <i>Materials and Structures</i> : 187-195.
[Ohdaira 2000]	Ohdaira E. and Masuyama N., 2000, Water content and its effects on ultrasound propagation in concrete. <i>Ultrasonics</i> , 38 :546–552.
[Okamura, 1995]	Okamura H. and Ozawa K., 1995, mix design for self-compacting concrete, <i>Library of JSCE</i> , N°: 25.
[Okamura, 2003]	Okamura H., Ouchi, M. (2003), "Self-compacting concrete", <i>Advanced Concrete Technology</i> , 1(1), 5-15.
[Otsuki, 2000]	Otsuki N., Iwanami M., Miyamoto S., and Hara N., 2000, Influence of aggregates on ultrasonic elastic waves propagation in concrete. In Elsevier, editor, <i>Non Destructive Testing in Civil Engineering</i> , pages 313–322, Tokyo, Japan.
[Ouchi, 1999]	Ouchi et al. (1999), "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 21, pp 1-6.
[Ould naffa, 2002]	Ould-Naffa S., Goueygou M., Piwakowski B., and Buyle-Bodin F., 2002, Detection of chemical damage in concrete using ultrasound. <i>Ultrasonics</i> , 40:247–251.
[Paco, 2010]	Paco Diederich, (2010), « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement auto-plaçant du béton », thèse de doctorat, l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
[Panesar, 2012]	Panesar, D.; Shindman, B. (2012) "The effect of segregation on transport and durability properties of self-consolidating concrete" <i>Cement and Concrete Research</i> V42 (2), 252-264.
[Park, 2005]	Park, Noh et Park, (2005), "Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures", <i>Cement and concrete research</i> , vol 35, pp 842-849.
[Pedersen, 2003]	Pedersen et Smeplass, (2003), "The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase", <i>Proceedings of the third international RILEM conference on SCC</i> , Reykjavik, Islande, pp 106-116.
[Philippidis-a, 2003]	Philippidis T.P. and Aggelis D.G., 2003, an acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. <i>Cem. Concr. Res.</i> , 33:525–538.
[Philippidis-b, 2005]	Philippidis T.P. and Aggelis D.G., 2005, Experimental study of waves dispersion and attenuation in concrete. <i>Ultrasonics</i> , 43:584–595.

[Pierre ; 2000]	Pierre B, Pierre H, Jean-Paul S, Gérard V., 2000. Manuel de Mécanique des roches. Les Presses de l'École des Mines, pp 42-47.
[Piwakowski, 2003]	Piwakowski B., Ffine A., Goueygou M., and Buyle-Bodin F., 2004, Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples. Ultrasonics, 42 :395–402.
[Piwakowski, 2003]	Piwakowski B., Safinowski P., and Kosecki A., 2008, Contrôle non destructif du béton par ultrasons à l'aide d'un dispositif automatisé. In Actes des journées COFREND, Toulouse, France.
[Plona, 1980]	Plona, T. J., 1980, Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies," Appl. Phys. Lett., vol. 36, p. 259.
[PNC, 2001]	PNC, (2001), « formulation et suivi rhéologique des bétons-la méthode MBE » Projet National Calibré-fabrication du béton, IREX, 25 pages.
[Popovics-a, 1996]	Popovics J.S., 1996, Comment on "Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves" [J. Acoust. Soc. Am. 98, 2142-2148 (1995)]. J. Acoust. Soc. Am., 100 (5):3451-3453.
[Popovics-b, 1990]	Popovics, S., Rose, J.L., and Popovics, J.S. (1990), "the behavior of ultrasonic pulses in concrete", Cem. Concr. Res., 20, 259.
[Powers, 1986]	Powers, (1968), "Properties of Fresh concrete", éditions Wiley, 664 pages.
[Powers, 1946]	Powers, T. C. and T. L. Brownyard (1946), "Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste," CIJournal, Proc, 43.
[Prada, 2005]	Prada C., Balogun O. and Murray, 2005, Laser-based ultrasonic generation and detection of zero-group velocity Lamb waves in thin plates. Appl. Phys. Lett., 87.
[Puech, 2004]	Puech, X. Rivoallan, and ChereL L., 2004, the use of surface waves in the characterisation of seabed sediments: development of a MASW system for offshore applications. In Colloque "Caractérisation in situ des fonds marins", Seatech week, Brest, France.
[Qixian, 1996]	Qixian L. and Bungey J.H., 1996, Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. Constr. Build. Mater., 10(4) :237–242.
[Rakesh, 2015]	Rakesh K. et al., (2015) "Self-Compacted Concrete Mix Design and its Comparison with Conventional Concrete (M-40), J. Civil Environ Eng. 5(3), 5: 176.
[Ramachandran, 1995]	Ramachandran V. S. (1995), 'Concrete Admixtures Handbook-Properties, Science, Technology', Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA.
[Rauch, 1980]	Rauch. D., 1980, <i>Seismic interface waves in coastal waters: A review</i> . SACLANT ASW.
[Regourd, 1982]	Regourd M. (1982), 'L'hydratation du ciment portland dans les bétons hydrauliques : connaissance et pratique', Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
[RILEM, 1973]	RILEM, (1973), Tests on the concrete by the method of the ultrasonic testing: recommendation of RILEM, Annals of the Technical Institute of the Building and Public Works, Series: Test and Measurements, No. 142.
[RILEM, 2010]	RILEM, (2010), "Production and Placement of Self-Consolidating Concrete", (eds.), Design Book series 1, DOI 10.1007/978-90-481-9664-7_18,
[Rols, 1999]	Rols S., Ambroise J., Péra J., (1999) "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete". Cem. Concr. Res., 29(2) :261–266
[Rooney, 2001]	Rooney, M.J. et al. (2001), "Development of the settlement column segregation test for fresh self-compacting concrete". In: Ozawa K, Ouchi M (eds) Self-Compacting Concrete. 2nd international symposium on self-compacting concrete, Tokyo. COMS Engineering Corporation, Fukui Kochi, p109.
[Roy, 1993]	Roy, D. M., P. W. Brown, D. Shi, B. E. Scheetz and W. May, (1993), Concrète Microstructure - Porosity and Permeability, SHRP-C-628, Materials Research Laboratory - The Pennsylvania State University
[Saak, 2001]	Saak et al., 2001, New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete, ACI Materials Journal, pp 429-439.
[Safinowski, 2007]	Safinowski P., Piwakowski B., Balayssac J-P., Goueygou M., Kosecki A., 2007, contrôle non destructif du béton par ultrason à l'aide d'un dispositif automatisé, IEMN DDOAE UMR CNR 8520, Ecole centrale de Lille. Laboratoire (LMDC INSA-UPS), France.
[Sanish, 2012]	Sanish K.B., Manu S., (2012) "Characterization of Strength Development of Concrete Using Ultrasonic Method" 18th World Conference on Non-destructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.

[Schubert, 2001]	Schubert F., Koehler B., 2001. Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity, <i>Journal of Computational Acoustics</i> , Vol. 9, No. 4, pp. 1543-1560.
[Schwhdenmann, 2005]	Schwdenmann, G. and al., (2005), Study of segregation in self-compacting concrete walls using gamma densitometry, 2nd North American Conference on the design and use of self-consolidating concrete and the 4th International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Oct 30-Nov 02, Chicago, USA.
[Sedran, 1999]	Sedran, (1999), « Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants », thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 220 pages.
[Selleck, 1998]	Selleck, S.F., Landis, E.N., Peterson, M.L., Shah, S.P., Achenback, J.D. (1998). Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage. <i>ACI Materials Journal</i> , vol. 95, no. 1, pp.27-36.]
[Shi, 1998]	Shi et al., (1998), "A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 20, pp 9-14.
[Shindoh, 2003]	Shindoh et Matsuoka, (2003), "Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods", <i>Journal of Advanced Concrete technology</i> , vol 1, n°1, pp 26-36.
[Sidky, 1981]	Sidky M, Legrand C, Barrioulet M (1981) "Influence of the concentration in aggregate and vibration time on internal segregation in fresh concrete". <i>Mat Struct</i> 14 (83) :367-377.
[Sierra, 1982]	Sierra, R., (1982), "Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C3S et de ciment Portland," <i>Bulletin de Liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées</i> , 117, 77-81.
[Silva, 2013]	Silva, P. and Brito, J. (2013), "Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler", <i>Adv. Concrete Constr.</i> , 1(1), 65-84.
[Sonebi, 2005]	Sonebi M. (2005), "Evaluation of the Segregation Resistance of Fresh Self-Compacting Concrete using different test methods" Conference Paper • DOI: 10.1617/2912143624.031.
[Su, 2003]	Su et Miao, (2003), "A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content", <i>Cement and concrete composites</i> , vol 25, pp 215-222.
[Sugamata, 1999]	Sugamata, et al., (1999), "A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers", <i>Transactions of the Japan Concrete Institute</i> , vol 21, pp 7-14.
[Tangtermsirikul, 2000]	Tangtermsirikul et al, (2000), <i>Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés</i> , thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 132 pages.
[Taylor, 1990]	Taylor H., (1990), 'Cement Chemistry', London.
[Tazawa, 1995]	Tazawa, E., S. Miyazawa and T. Kasai, (1995), "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste", <i>Cement and Concrete Research</i> , 25, 2, 288-292.
[Toutou, 2002]	Toutou, (2002), « Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité », thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Rennes, 221 pages.
[Tribikram, 2014]	Tribikram K. (2014) Ultrasonic and Electromagnetic Waves for Nondestructive Evaluation and Structural Health Monitoring. 1st International Conference on Structural Integrity, Dep. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Dep. of Aerospace and Mechanical Engineering University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA.
[Ulm, 2001]	Ulm F.J., Bazant Z. et Wittmann F., (2001), eds: 'Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials' Cambridge, USA, Elsevier. TAYLOR H., (1990), 'Cement Chemistry'. London.
[Uysal, 2012]	Uysal M, Yilmaz K, Ipek AM.,(2012), "The effect of mineral admixtures on mechanical proper- ties, chloride ion permeability and impermeability of selfcompacting concrete. <i>Construction and Building Materials</i> 27, pp 263-270.
[Vakhshouri, 2016]	Vakhshouri and Nejadi, (2016), "Self-compacting light-weight concrete; mix design and proportions. <i>Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal</i> 58, pp143-161.
[VanBreugel-a, 2001]	Van Breugel, K., (2001), 'Stress prédictions in hardening concrète', The rôle of microstructural development, IPACS Report.
[Van Breugel-b, 2001]	Van Breugel, K., (2001), Hydration of Cement-Based Systems. Aspects of hydration of cement-based Systems and possibilities to quantify the évolution of hydration processes, IPACS report 2.1-T1, Sweden, Department of Civil & Mining Engineering Division of Structural Engineering

[Van Breugel, 1995]	Van Breugel, K., (1995), «Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cement-based materials (I) Theory," <i>Cement and Concrete Research</i> , 25, 2, 319-331.
[Van Bui-a, 1999]	Van Bui et Montgomery, (1999), "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume", <i>Proceedings of the 1st international RILEM Symposium</i> , Stockholm, pp 373-384.
[Van Bui-b, 2002]	Van Bui, Akkaya et Shah, (2002), "Rheological model for self-compacting concrete", <i>ACI Materials Journal</i> , vol 99, n°6, pp 549-559.
[Vergara, 2001]	Vergara L., Miralles R., Gosálbez J., Juanes F.J., Ullate L.G., Anaya J.J., Hernández M.G., and Izquierdo M.A.G., 2001, NDE ultrasonic method to characterize the porosity of mortar. <i>NDT&E International</i> , 34:557-562.
[Vernet, 1991]	Vernet C., Cadoret G., (1991), ' Voies nouvelles du béton, suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances, Cachan, France.
[Villain, 2008]	Villain G., Derobert X., Abraham O., Chekroun M., Coffec O., and Durand O., 2008, Complémentarités de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques. In <i>Actes des journées COFREND</i> , Toulouse, France.
[Wallevik, 2003]	Wallevik, (2003), "Rheology; A scientific approach to develop self-compacting concrete", <i>Proceedings of the third international RILEM conference on SCC</i> , Reykjavik, Islande, 23-31.
[Walton, 1987]	Walton K. W., 1987, the effective elastic moduli of a random packing of spheres," <i>J. Mech. Phys. Solids</i> , vol. 35, no. 2, pp. 213-226.
[Waterman, 1961]	Waterman, R. Truell., (1961) Multiple scattering of waves, <i>Journal of Mathematical Physics</i> , Vol. 2, No. 4, pp. 512-537.]
[Winkler, 2003]	Winkler K. W., 1983 Contact stiffness in granular porous materials: comparison between theory and experiment," <i>Geophys. Res. Lett.</i> , vol. 10, no. 11, pp. 1073-1076.
[Winkler, 2003]	Winkler K. W., 1983 Contact stiffness in granular porous materials: comparison between theory and experiment," <i>Geophys. Res. Lett.</i> , vol. 10, no. 11, pp. 1073-1076.
[Wittmann-a, 1968]	Wittmann, F. H., (1968), "Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste," <i>Matériaux et Constructions</i> , 1, 6, 547-552.
[Wittmann-b, 1980]	Wittmann, F. H., (1980), ' Propriétés de la pâte de ciment durcie', 7ème congrès international de la chimie des ciments, Paris, Septima, 1.
[Wu, 1995]	Wu T.T., Fang J.S., Liu G.Y., and Kuo M.K., 1995, Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves. <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> , 98(4) :2142.
[Xie, 2002]	Xie Y, Liu B, Yin J, Zhou S (2002). Optimum mix parameters of high strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash, <i>Cement Concrete Res</i> .32: 477-480.
[Ye-a, 2005]	Ye, G., (2005), "Percolation of capillary pores in hardening cement pastes," <i>Cement and Concrete Research</i> , 35,167-176,
[Ye-b, 2004]	Ye, G., P. Lura, K. van Breugel and A. L. A. Fraaij,(2004), "Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement," <i>Cement and Concrete Composites</i> , 26,491-497,
[Yen, 1999]	Yen et al., (1999), "Flow behaviour of high strength high-performance concrete", <i>cement and concrete composites</i> .
[Zhou, 1995]	Zhou F.P., Lydon F.D., and Barr B.I.G., 1995, Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. <i>Cem. Concr. Res.</i> , 25(1) :177-186.
[Zhu, 2001]	Zhu W., Quinn J., and Bartos PJM., (2001), Transport properties and durability of self-compacting concrete. <i>Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete</i> , Tokyo, Japan, pp 451-458.
[Zhu, 2005]	Zhu et Gibbs, (2005), "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete", <i>Cement and concret research</i> , vol 35, pp1457-1462.

#

Annexes

Annexe 1 Formulation du béton

Composition

On fixe le dosage en gros granulats à 50% de sa compacité et celui de sable à 40% du volume totale du mortier :

La composition de la pâte est déduite à partir des paramètres Eau /liant et fillers/liant.

Détermination du dosage en gravier :

Masse volumique apparente : $m_{app}^v =$

Masse volumique absolue : $m_{abs}^v =$

Compacité : $\gamma = \frac{m_{app}^v}{m_{abs}^v} =$

Dosage volumique en gravier : $D_g^v = 50\% \cdot \gamma =$

Dosage pondérale :

Détermination du dosage en sable

$D_s^v = 40\% \cdot V_m =$

$V_m(\text{litres}) = (1000 - g) = s + c + sp + eg + v$

Dosage volumique en sable : $D_s^v = 0.40(1000 - g)$

Dosage pondérale :

Optimisation de la composition du mortier →

Le dosage volumique du ciment.

$$c = \frac{1000 - g - s - v}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \frac{a}{1-a} + \left(\frac{\rho_c}{\rho_{sp}} \cdot b(1 + k^1) + d \cdot \rho_c \right) \left(1 + \frac{a}{1-a} \right)}$$

1^{er} étape,

On fixe E/L = 0,48 pour les bétons N AP

Et E/L = 0,32 pour les bétons AP

g ; Volume granulats.

S ; Volume sable.

c ; Volume ciment.

f ; Volume fillers.

sp ; Volume super-plastifiant.

eg ; Volume eau de gâchage.

v ; Volume des vides.

C, F, Eg, Sp : dosages pondérale des ; ciment, filler, eau de gâchage et de super plastifiant.

ρ_c ; Masse volumique absolue du ciment.

ρ_f ; Masse volumique absolue du filler

ρ_{sp} ; Masse volumique absolue du super plastifiant.

$$E = E_g + E_{sp} = E_g + ksp$$

$$a = \frac{F}{C + F} = \frac{\rho_f \cdot f}{\rho_c \cdot c + \rho_f \cdot f}$$

$$b = \frac{Sp}{C + F} = \frac{\rho_{sp} \cdot Sp}{\rho_c \cdot c + \rho_f \cdot f}$$

$$d = \frac{E}{C + F} = \frac{E_g \cdot ksp}{\rho_c \cdot c + \rho_f \cdot f}$$

¹ L'eau totale « E » est la somme de l'eau de gâchage E_g et de l'eau contenue dans le super-plastifiant E_{sp} . On a donc : $E = E_g + E_{sp}$ et $E_{sp} = k \cdot SP$. La masse d'extrait sec du super-plastifiant est de l'ordre de 40%, et donc $k = 0,6$.

2^{ème} étape,

Le dosage en super plastifiant, est le dosage de saturation.

Suite aux travaux réalisés dans l'université de Constantine [Bensebti, 2008], il a été remarqué que le dosage en saturation du liant, est en relation avec les proportions de ciment et de fillers adoptés. Cette relation qui semble linéaire et obéit à la relation suivante :

$$\text{Avec : } \quad \text{SP} = F \times \text{SP}_F + C \times \text{SP}_C$$

SP le dosage de saturation du mélange F+C,

SP_F = 0,8%, dosage de saturation du coulis de filler

et SP_C = 2%, le dosages de saturation de ciment,

C et F sont les proportions rapportées à l'unité du ciment et du fillers dans le mélange.

Le dosage volumique du ciment.

$$c = \frac{1000 - g - s - v}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \frac{a}{1-a} + \left(\frac{\rho_c}{\rho_{sp}} \cdot b(1+k) + d \cdot \rho_c \right) \left(1 + \frac{a}{1-a} \right)}$$

Dosage pondérale **du ciment** :

Béton	Composition en kg/m ³								
	G (5-15 mm)	S (0-5 mm)	Ciment (C)	Fillers (F)	Eau (W)	Super- Plastifiant(S _p)	a* = F/L (%)	b* = S _p /L (%)	d* = E/L (%)
C01	775	736	495	0.0	237.8	9.91	0.00	2.00	48
C02	775	736	477	24	235.2	9.71	4.76	1.94	47
C03	775	736	460	46	232.5	9.50	9.09	1.88	46
C04	775	736	457	55	230.2	9.49	10.71	1.86	45
C05	775	736	454	64	227.8	9.48	12.28	1.83	44
C06	775	736	452	72	225.3	9.47	13.79	1.81	43
C07	775	736	450	81	222.8	9.46	15.25	1.78	42
C08	775	736	429	107	219.8	9.11	20.00	1.70	41
C09	775	736	618	0.0	198.0	12.35	0.00	2.00	32
C10	775	736	577	29	200.0	11.76	4.76	1.94	33
C11	775	736	550	55	200.0	11.37	9.09	1.88	33
C12	775	736	528	84	196.0	11.06	13.79	1.81	32
C13	775	736	509	102	195.0	10.75	16.67	1.76	32
C14	775	736	488	122	195.0	10.36	20.00	1.70	33

* [L; Liant, (a=F/L); Dosage filler/Liant, (b=Sp/L); Dosage super plastifiant /Liant, (d=E/L); Dosage eau/Liant.]

La variation de la composition concerne le dosage en fillers " $a = F/L$ " variant de 0% à 25% du liant, le dosage en super-plastifiant " $b = Sp/L$ " variant de 1.70 à 2,00% du liant et le dosage en eau " $d = E/L$ " variant de 32 à 48 % du liant (le liant comprend le ciment et les fillers).

Remarque :

Les propriétés essentielles des BAP frais sont :

→ *Une excellente Fluidité (an Excellent deformability)*

→ *Une bonne stabilité (a good sability)*

(Par stabilité on entend ; la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage).

→ *Un risque minime de blocage (alow risque of blockage)*

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE		CARACTERISTIQUE MECANIQUE	
ELEMENTS	% EN MASSE	NORME NA		NORME NA	EN MPA
PAF 975°C	1 - 2	NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	COMPRESSION
CaO	55 - 65	NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60	02 jours ≥ 12.50
SiO ₂	22 - 28	NA230	FIN DE PRISE	150 - 250	07 jours 25 - 35
Al ₂ O ₃	5 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm	28 jours 42.5 - 52.5
Fe ₂ O ₃	3 - 3,6	NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000	FLEXION
MgO	1 - 2	NA231			02 jours 3,0-4,0
K ₂ O	0,3 - 0,6				07 jours 5,0-6,5
Na ₂ O	0,1 - 0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000	28 jours 6,5-8,5
SO ₃	1.8 - 2,5	COPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS	
CaOL	0,8 - 1,8	C3S	55 - 65	CLINKER	≥ 74
CL ⁻	0 - 0,01	C2S	10 - 25	GYPSE	4 - 6
		C3A	8 - 12	CALCAIRE	0
		C4AF	9 - 13	LAITIER	≤ 20

DOMAINE D'UTILISATION
Utilisation courante de notre ciment :

- Fondations (béton de propreté et béton de semelle en milieux non agressifs).
- Ouvrage en béton armé (Murs, Linteaux, Poteaux et dalle de compressions).
- Dallage en béton, Montage de mure et maçonnerie et Scellemnts de carrelage (Dalles, pierres et carrelage)
- Chape (mortier de ciment)

PRECAUTION D'EMPLOI
Ce type de ciment ne convient pas pour :


- Ouvrages en milieux agressifs (terrains gypseux, sulfates, eaux industriels) emploi obligatoire de ciment ES pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
- Travaux à la mère (emploi obligatoire de ciment PM pour travaux à la mer).
- Bétonnage au dessous de 5° C (il est conseillé d'utiliser des ciments de résistance initiale élevée R)

STOCKAGE :
Eviter :

- Un stockage prolongé au-delà de trois (03) mois.
- Un stockage dans des endroits humides.

EMBALLAGE :
Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis, le système de fermeture garantie l'inviolabilité du

ATTENTION
Un contact prolongé du ciment avec la peau peut être irritant.


 Cimenterie de HADJAR-SOUD
 SERVICE RECEPTION CONTRÔLE QUALITE

Annexe 3 Composition chimique et caractéristiques physiques du filler

Les Fillers : Les additions utilisées dans ce travail sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80 μ m, des fillers calcaire, de provenance ENG d'El Khroub, noté UF ; dont les principales caractéristiques que nous présentons proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG.

Tableau. A2.1-Composition chimique du filler calcaire

Composant	Teneur en %	Composant	Teneur en %
SiO ₂	0.06	Al ₂ O ₃	0.09
Fe ₂ O ₃	0.02	CaCO ₃	99
MgO	0.01	SO ₃	0.01
Perte au feu	43.8	PH	9

Tableau. A2.2- Caractéristiques physiques des fillers

Fillers	Poids spécifique	Densité apparente	Blancheur	Prise d'huile	Humidité
UF20	2.7 Kg/l	1.23	92%	18%	0.1%

Pour les morphologiques du filler calcaire utilisé, le diamètre moyen des grains des fillers « diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieur » est de l'ordre 19 μ . 98% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 200 μ , et 26% un diamètre inférieur à 10 μ .

Tableau. A2.3-Référence



ENG
LABORATOIRE CENTRAL
Rapport d'analyse

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : 34355-63

File name: PRODUITS ETRANGERS
Record Number: 84
02/08/2012 10:49:32

NOTICE TECHNIQUE

2 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1 et 3.2, NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

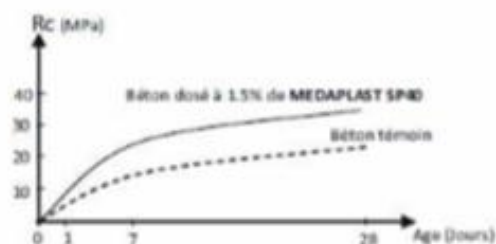
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore < 1g/L
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** 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 été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

PRÉCAUTIONS 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 Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de conformance pour déterminer la technique d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

