
Investigation de la ségrégation des bétons par les ultrasons.

GRINI Abdelouaheb^{1,2}, BENOUIS Abdelhalim²

¹ Université Constantine-3-, Département Architecture, Constantine, Algérie. E-mail:grinilam@gmail.com

² Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH, Université 8 mai 1945, Guelma, Algérie.
E.mail:benouis_h@yahoo.fr

RÉSUMÉ. La ségrégation est un phénomène de séparation des constituants d'un béton ou d'un mortier frais, qui peut être provoqué par une mauvaise composition, un malaxage insuffisant, ou une vibration excessive. Les essais de caractérisation sont multiples, existe-t-il ou non des relations entre les différents essais d'ouvrabilité actuellement utilisés pour caractériser les bétons en général et les BAP en particulier ? L'utilisation d'une méthode de caractérisation non destructive (la méthode par vitesse de pulsation) peut apporter une réponse et se substituer à ces essais. L'objectif est d'étudier les mécanismes de ségrégation des bétons, d'analyser les corrélations entre les différents indices de ségrégation et essayer de les relier aux vitesses des ultrasons.

Nous sommes parvenu aux résultats des essais selon les techniques existant de caractérisation de la ségrégation des bétons, pour le béton frais- l'essai de stabilité au tamis- et pour celle du béton en cours de durcissement- la technique de comptage des gros granulats prélevés sur des moules prismatiques 10x10x50 cm. Les vitesses des ultrasons ont été réalisées sur les mêmes éprouvettes pour dix sept compositions de bétons pour déterminer un rapport des vitesses à travers la partie supérieure sur celle de la partie inférieure.

Nous montreront que, Les bétons qui ne présentent pas de ségrégation (stabilité au tamis et résistance à la ségrégation par comptage) ont un indice ultrasonique de ségrégation dépassant les 98 %. Donc cette méthode ultrasonique peut s'avérer une alternative rapide à la caractérisation de la ségrégation du béton frais ou d'auscultation de la ségrégation du béton durci.

ABSTRACT. The segregation is a separation between components of concrete or a fresh mortar, who can be caused by an insufficient malaxation or an excessive vibration or a significant fluidity. The literature reports many tests to characterize concrete's maniability, slump-test, maniabilimeter LCPC, cylinder's tests, column's tests, ball's tests, the pallet's tests, are some examples. it also exist some tests samples of hardened concrete or in the course of hardening. These are generally based on the percentage of the coarse aggregates between the top and the bottom of the samples. This work is interest to study the mechanisms of concrete's segregation, to analyze the correlations between the various indices of segregation and theirs correlations with ultrasonic pulse velocities. The segregation characterization of fresh concrete was carried out by the sieve test and that of the hardened concrete by a counting technique of coarse aggregates on prismatic samples 10x10x50 cm³. Ultrasonic velocities were carried out on the same samples for seventeen concretes compositions to determine an ultrasonic velocity ratio through the sample's top part on that of the bottom part. The six concretes that not present segregation (sieve stability lower than 15 % and segregation resistance by counting higher than 95 %) have an ultrasonic segregation factor approaching 100%. Thus this ultrasonic method can be a fast alternative to characterize fresh concrete segregation.

MOTS-CLÉS : Béton, Stabilité, Vitesse ultrasonique, Corrélation.

KEYWORDS: Segregation, concrete, stability, ultrasonic pulse velocity, correlations.

1. Introduction

La ségrégation est donc un phénomène de séparation des constituants d'un béton ou d'un mortier frais, qui peut être provoqué par un défaut dans sa composition ou dans sa mise en œuvre.

La teneur en eau est un des paramètres fondamentaux dans la composition du béton. Si la teneur en eau est excessive, apparaît alors le phénomène de ségrégation (séparation entre le gravier plus dense et le mortier). L'utilisation d'adjuvants (plastifiants, fluidifiants, ...) conduit aussi à obtenir des bétons fluides sans excès d'eau mais conduisent aussi parfois à la ségrégation.

La littérature décrit bien des essais de caractérisation de la ségrégation du béton, essais au cylindre, à la colonne, à la bille, à la palette, etc. en sont des exemples. On retrouve aussi des essais sur éprouvettes de béton durci ou en cours de durcissement. Ces derniers se fondent généralement sur des techniques de comptage du pourcentage des gros granulats. On remarque la multitude d'essais utilisés pour caractériser la ségrégation, Existe-t-il ou non des relations entre les différents essais d'ouvrabilité actuellement utilisés pour caractériser les bétons en général et les BAP en particulier ?

L'utilisation d'une méthode de caractérisation non destructive se substituer à ces essais. 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 l'homogénéité et 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 sur le plan théorique.

De nombreux chercheurs ont publié des résultats sur ces deux propriétés [NAIK 91]. Plusieurs chercheurs indiquent que la relation entre la résistance et la vitesse des pulsations n'est pas directe et que plusieurs paramètres interviennent dans cette relation – composition du béton, son humidité...-[NAIK 91]. Les standards RILEM (Europe), ASTM (Etats-Unis) et le British Standards Association (Grande-Bretagne), proposent des procédures pour établir ces corrélations. 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.

L'objectif est d'étudier les mécanismes de ségrégation des bétons, d'analyser les corrélations entre les différents indices de ségrégation et d'essayer de les relier aux vitesses des ultrasons. Cette voie demande de comprendre les implications du choix de tel « ou tel » méthode à des fins d'estimation. C'est à cette question que cet article est consacré. L'analyse de cette question reposera sur une étude bibliographique approfondie des méthodes empiriques disponibles et le recours à des corrélations synthétiques permettant de reproduire les étapes majeures de la procédure d'estimation.

2. Méthodologie et expérimentation

La figure 1 reproduit le schéma suivi dans une procédure de caractérisation de la ségrégation des bétons. Ce schéma se résume, aux étapes : 1,2 et 3 sur la base d'une méthode de caractérisation de type destructif (CD), et de caractérisation non destructifs en place (CND). On estime l'indice de ségrégation f . Cette procédure peut être directe, ou indirecte (avec une éventuelle corrélation), certains paramètres des essais étant corrigés sur la base de quelques mesures complémentaires de résistance sur des éprouvettes 'perfectionnées par les mêmes bétons testés'. La qualité de l'estimation dépend donc de la précision et de la représentativité des mesures, de la méthode (CND) et de la procédure employée pour la corrélation, Figure.1.

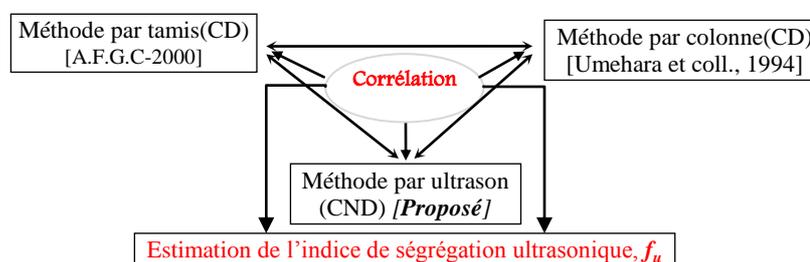


Figure 1. Schéma de la procédure de corrélation des différents indices de ségrégation.

3. Caractérisation de la ségrégation des bétons.

Plusieurs techniques sont utilisées dans la littérature et qui se basent sur le même principe des méthodes, Umehara et coll., 1994 et [LOW 03]. Le béton frais est mis en place dans un cylindre (figure 2.) et un coefficient de résistance à la ségrégation du béton est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$f = A/B \quad [1]$$

Où A : la masse de granulats secs de la section supérieure.

B : la masse de granulats secs de la section inférieure.

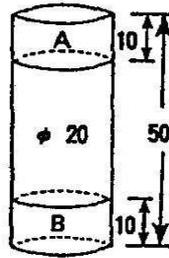


Figure 2. Cylindre d'échantillonnage et détermination de la résistance à la ségrégation « f ». [LOW 03]

D'après Lowke et al. [LOW 03], un béton ayant une bonne résistance à la ségrégation présentera un coefficient de résistance à la ségrégation f supérieur à 95 %.

Suivant le même principe, on a utilisé un moule métallique de forme carrée de 10 cm de côté et 50 cm d'hauteur pour notre étude afin de déterminer un coefficient similaire se basant sur un rapport des vitesses ultrasoniques.

3.1. Caractérisation de la ségrégation par les ultrasons.

La méthode par vitesse de pulsations (méthode rapide, simple de mise en œuvre...) est utilisée dans cette étude pour la caractérisation de la ségrégation du béton. L'hétérogénéité dans le béton entraîne des vitesses de propagation différentes. La vitesse de propagation est d'autant plus grande que la proportion de granulats est grande.

Donc on se basant sur la technique précédente de caractérisation de la ségrégation des bétons, des essais de mesure des vitesses des ultrasons à travers les bétons frais pour établir des corrélations entre ces vitesses et la stabilité au tamis « π », d'une part, et la résistance à la ségrégation « f » d'autre part. Le coefficient de résistance à la ségrégation par les ultrasons proposé sera donc :

$$f_u = f_{uA} / f_{uB} \quad [2]$$

Où :

$$f_{uA} = V_{pA} - V_{vA} \quad [3]$$

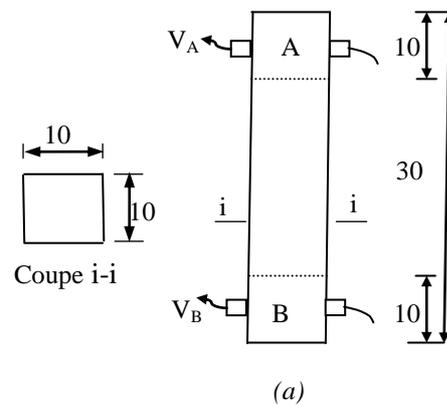
$$f_{uB} = V_{pB} - V_{vB} \quad [4]$$

et $V_{p(A,B)}$: vitesse ultrasonique à travers l'éprouvette pleine de béton.

$V_{v(A,B)}$: vitesse ultrasonique à travers l'éprouvette vide.

A : La section supérieure de l'éprouvette.

B : La section inférieure de l'éprouvette.



(b)



(c)

Figure 3. Procédure de la détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons « f_u »

- (a) Mesures en mode direct des vitesses ultrasoniques
- (b) Appareil ultrasonique
- (c) Transducteurs utilisés 54kHz

4. Programme expérimentale :

4.1. Matériaux utilisés

Pour la confection des bétons étudiés, on a utilisé les matériaux Algérien, un gravier calcaire concassé 5/15 et un sable concassé 0/5, de la carrière de SARL SAPAM, Bendjerah Guelma, Algérie, un ciment de type CEM II-A (classe 42.5) de Hedjar Essoud (Algérie), un super-plastifiant Médaplast SP40 de Granitex et des fillers calcaires de la carrière ENG (Elkhroub),

4.2. Formulations testées

Les ajouts fillers, avec les grains de ciment, comblent les interstices granulaires rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Le rôle propre du super-plastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à sa propriété dispersante), ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire.

La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition dans les bétons auto-plaçants peut également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques. En effet, on considère que le mortier atteint sa compacité maximale lorsque le dosage critique en filler est atteint [YAH 05]. Au-delà de ce dosage, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes

Les paramètres d'étude sont le dosage en filler calcaire exprimé par « Fillers/Liant » et le dosage en eau exprimé par « Eau/Liant ». En fixant, donc, le dosage en super-plastifiant à sa saturation, la formulation a été conduite selon les recommandations de la méthode japonaise proposée par [OKA 03] et celle des démarches suivies par [BEN 08].

Le dosage en gros granulats (5/15) est fixé à 50% de sa compacité et celui du sable à 40% du volume total du mortier. Le volume de pate du BAP doit favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant le cout en matières premières de cette formulation [ASS 03]

Le tableau 1 résume les compositions utilisées ;

Tableau 1. Compositions des bétons testés

Béton	Dosage en kg/m ³								
	Gravier	Sable	Ciment	Fillers	Eau	Super-plastifiant	a (%) =F/L	b (%) =S _p /L	d (%) = E/L
B01	775	736	495	0	237,8	9,91	0,00	2,00	48
B 02			477	24	235,2	9,71	4,76	1,94	47
B03			460	46	232,5	9,50	9,09	1,88	46
B04			457	55	230,2	9,49	10,71	1,86	45
B05			454	64	227,8	9,48	12,28	1,83	44
B06			452	72	225,3	9,47	13,79	1,81	43
B07			450	81	222,8	9,46	15,25	1,78	42
B08			448	90	220,2	9,45	16,67	1,76	41
B09			440	97	220,1	9,32	18,03	1,74	41
B10			433	104	219,9	9,18	19,35	1,71	41
B11			429	107	219,8	9,11	20,00	1,70	41
B12			618	0	198	12,35	0,00	2,00	32
B13			577	29	200	11,76	4,76	1,94	33
B14			550	55	200	11,37	9,09	1,88	33
B15			528	84	196	11,06	13,79	1,81	33
B16			509	102	195	10,75	16,67	1,76	32
B17			488	122	195	10,36	20,00	1,70	32

4.3. Programme d'essais

Des moules prismatiques en acier ont été utilisés pour la confection des éprouvette de section 100 cm² et de volume 50000 cm³ (a=10 cm, h=50 cm). La variation de la composition a concerné le dosage en filler ($a=F/L$) variant de 0% à 20% du liant, le dosage en super-plastifiant ($b=S_p/L$) 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). Dix sept (17) compositions ont été utilisées pour cette étude (tab. 1)

L'étude expérimentale réalisée sur ces compositions a concerné, en première étape, la caractérisation du caractère auto-plaçant de ces bétons et, en deuxième étape, la caractérisation de la ségrégation par ;

- ✓ La stabilité au tamis (π),
- ✓ L'indice de la résistance à la ségrégation (f),
- ✓ Et l'indice ultrasonique de la ségrégation (f_u).

4.3.1. Détermination de l'indice ultrasonique de ségrégation

Il est possible de déterminer, à l'aide des ultrasons, la variation de la densité du béton selon la hauteur. En effet, le mortier et les granulats ne transmettent pas le son à la même vitesse. Ces différences peuvent donc servir à évaluer la quantité de granulats en fonction de la hauteur. La procédure expérimentale consiste à mesurer les vitesses des ultrasons à travers le béton frais dans les parties supérieures et inférieures de l'éprouvette (fig. 2-a). La fréquence des transducteurs utilisés est de 54 hertz (fig. 2-c)

Le résultat de l'indice ultrasonique est exprimé par le rapport de la vitesse des ultrasons dans la partie supérieure A sur celle de la partie inférieure B.

Ainsi, pour tous les mélanges, on a procédé à la détermination de la stabilité au tamis, l'indice ultrasonique de ségrégation et l'indice de la résistance à ségrégation. Ces essais ont concerné trois éprouvettes pour chaque composition de béton.

5. Résultats et analyse

Les résultats des essais pour caractériser la ségrégation des bétons sont résumés par le tableau suivant :

Tableau 2. Résultats des essais de caractérisation de la ségrégation.

	$a=F/L$ (%)	$b=S_p/L$ (%)	$d=E/L$ (%)	π (%)	f (%)	f_u (%)
B01	0,00	2,00	48	24,08	58,30	65,50
B 02	4,76	1,94	47	16,49	64,30	57,80
B03	9,09	1,88	46	16,84	53,60	46,80
B04	10,71	1,86	45	16,12	52,00	45,90
B05	12,28	1,83	44	16,08	46,10	53,30
B06	13,79	1,81	43	16,91	58,50	41,20
B07	15,25	1,78	42	16,23	57,40	49,30
B08	16,67	1,76	41	15,45	47,10	38,80
B09	18,03	1,74	41	23,2	62,90	43,60
B10	19,35	1,71	41	25,87	44,00	38,50
B11	20,00	1,70	41	23,53	47,70	35,20
B12	0,00	2,00	32	6,60	95,3	99,10
B13	4,76	1,94	33	6,35	95,2	98,00
B14	9,09	1,88	33	3,30	95,1	98,70
B15	13,79	1,81	33	10,98	95,1	99,90
B16	16,67	1,76	32	4,67	96,4	99,60
B17	20,00	1,70	32	11,45	95,3	97,40

On remarque que les onze premiers bétons ne sont pas auto-plaçants avec une stabilité au tamis supérieure à 15 %, Les six derniers bétons (B12 à B17) sont auto-plaçants et présentent des stabilités au tamis inférieures à 15% et des coefficients de résistance supérieurs à 95 %. Ces bétons présentent des indices ultrasoniques de ségrégation se rapprochant de 100%.

L'effet du dosage en eau est illustré par la figure 3, on y remarque une influence importante de ce paramètre sur la ségrégation des bétons. La ségrégation se manifeste, par les trois indicateurs, pour les rapports E/L supérieurs à 0.33. Une augmentation du rapport E/L de 28 % provoque une augmentation des indicateurs de la ségrégation f_u , f et π (tamis) respectivement de 15 %, 100% et 200 % pour les bétons avec 20 % de fillers.

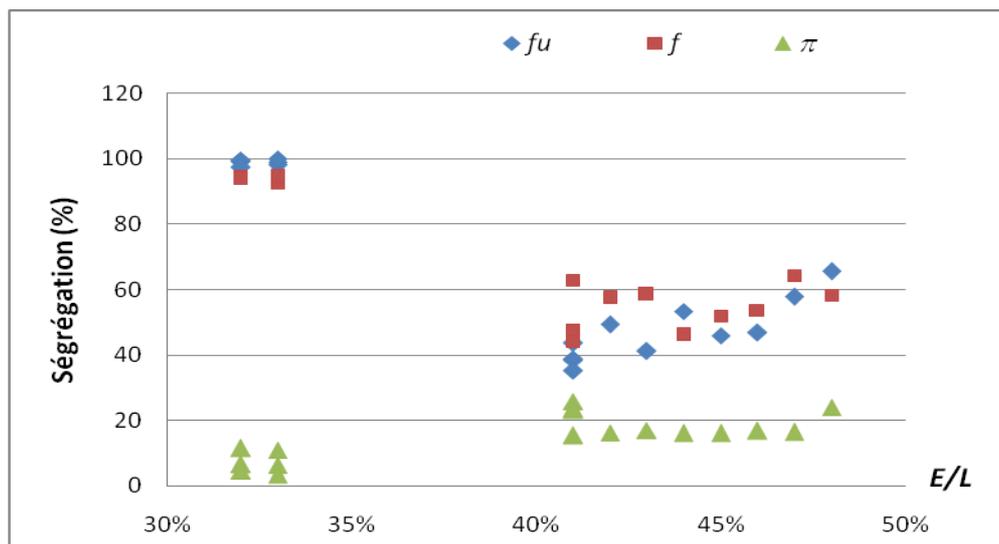


Figure 4. Evolution des indicateurs de la ségrégation (f_u , f et π) avec le rapport E/L

La figure 5 montre les évolutions de deux indicateurs de la ségrégation (f_u et f) avec le rapport F/L qui sont similaires dans les deux cas. Le coefficient ultrasonique f_u est moins sensible que le coefficient de résistance f à la variation de la composition en fines du béton surtout pour les bétons non stables. Cette variation est respectivement de 8% et 22% pour une variation du rapport F/L de 20%. Ceci est dû au fait que les vitesses sont déterminées dans le béton (à travers le mortier et le gravier) alors que pour l'indice f , on ne tient compte que du gravier.

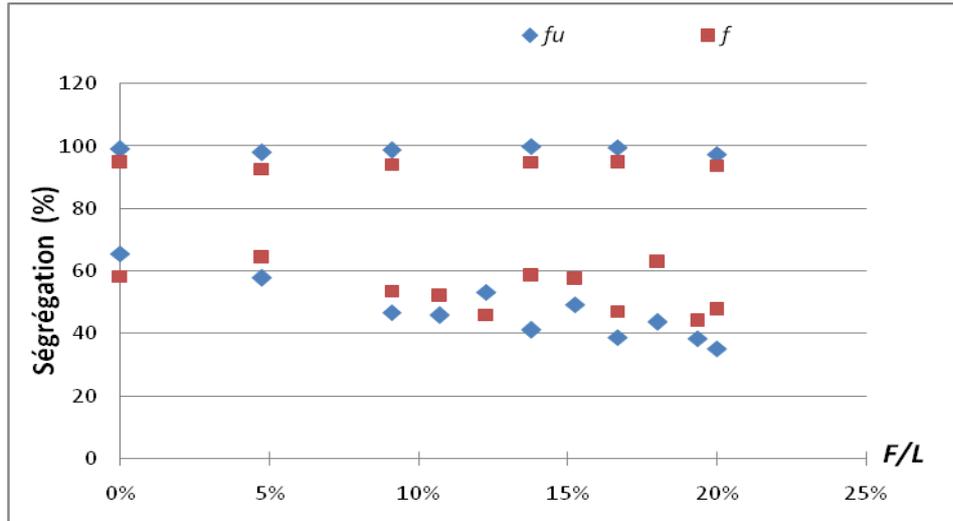


Figure 5. Evolution des indices de ségrégation (f_u et f) avec le rapport F/L

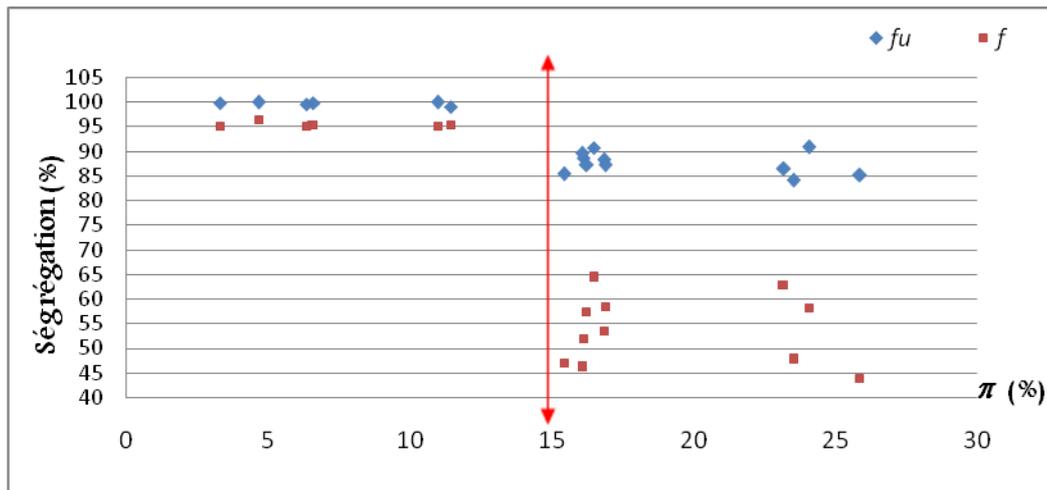


Figure 6 : Relations entre la stabilité au tamis (π) et les résistances à la ségrégation (f_u et f)

Les bétons stables sont ceux ayant une stabilité au tamis inférieure à 15%, il s'avère que tous ces bétons ont présenté un indice ultrasonique f_u supérieure à 98% (Fig. 6). On peut noter, alors que quand la différence dans la teneur en granulats dans la colonne (f) ne varie pas de plus de 5%, l'indice ultrasonique à la ségrégation f_u ne varie pas de plus de 2% pour des bétons stables. Comme l'indique Sedran [SED 99] pour la réception du béton frais sur chantier, on peut donc considérer la méthode ultrasonique comme l'une des méthodes pour la caractérisation de la ségrégation.

6. Conclusion

Cette étude expérimentale a permis de tester une méthode non destructive pour diagnostiquer la qualité et l'homogénéité des bétons en terme de ségrégation. Il s'avère à travers les bétons testés que le dosage en eau est un paramètre déterminant dans la manifestation de la ségrégation avec une proportionnalité entre eux. Une augmentation du rapport E/L de 28 % provoque des augmentations très différentes des indicateurs de la ségrégation f_u , f et π (tamis) mais dans la même tendance. L'indice de ségrégation ultrasonique f_u est moins sensible que celui de la résistance à la ségrégation f à la variation de la composition en fines du béton surtout pour les bétons non stables. Cette variation est respectivement de 8% et 22 % pour une variation du rapport F/L de 20%. Ceci est dû à ce que les vitesses ultrasoniques sont déterminées à travers la pâte de ciment et le squelette granulaire alors que pour l'indice f , on ne considère que le gravier. Les bétons stables sont ceux ayant une stabilité au tamis inférieure à 15%, il s'avère que tous ces bétons ont présenté un indice de résistance f supérieur à 95% et un indice ultrasonique f_u supérieur à 99 %.

Donc cette méthode ultrasonique peut s'avérer une alternative rapide à la caractérisation de la ségrégation du béton frais ou d'auscultation de la ségrégation du béton durci.

7. Bibliographie

- [ASS 03] Assie S., Durabilité des bétons auto-placants , thèse de doctorat, INSA de Toulouse, France, 2004.
- [ASS 00] Association Française de Génie Civil, Les bétons autoplacants, Recommandations provisoires, France, 2000.
- [BEN 08] Bensebti S., Essai de caractérisation expérimentale de la ségrégation verticale des bétons autoplacants, thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie, 2008.
- [LOW 03] Lowke A. et al. « A simple and significant segregation test for SCC», *Proceedings of the third international RILEM conference on SCC*, Reykjavik, Islande, 2003.
- [NAIK 91] NAIK T. R., Malhotra, V.M., *The ultrasonic pulse velocity method. crc handbook on nondestructive testing of concrete*, Editeur, V.M. Malhotra, N.J. Carino. CRC press, 1991,
- [Okamura 03] Okamura H., Masahiro O., «Self-Compacting Concrete», *Journal of Advanced Concrete Technology*, V1 (1), 2003, PP5-15.
- [SED 99] Sedran S., Rhéologie et rhéométrie des bétons : application aux bétons auto-nivelants, thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 1999.
- [YAH 05] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, CCR journal V35(3), 2005, PP532-539.