

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées  
Département Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**SAADOUN HACENE  
TELDJOUNE NABILE**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : **Ingénierie des Matériaux de Construction**

**Thème :**

**ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN  
BETON DEGRADE PAR SEGREGATION  
(CAS DE BETON ORDINAIRE)**

Devant le jury composé de :

**M<sup>r</sup> KENNOUCHE Salim  
M<sup>me</sup> MEZIANE Roufida  
M<sup>r</sup> HAMI Brahim  
M<sup>me</sup> ARAB Bahia**

UAMOB  
UAMOB  
UAMOB  
UAMOB

Président  
Encadreur  
Examineur  
Examineur

Année Universitaire 2015/2016

## **Dédicaces**

A mes enfants

A ma femme

A toute ma famille

Je dédie ce travail

**Hacene**

## **Dédicaces**

A mes parents

A mes frères et sœurs

A toute ma famille

Je dédie ce travail

**Nabile**

## REMERCIEMENTS

Nous tenons dans un premier lieu à exprimer nos plus vifs remerciements à Madame MEZIANE Roufida Enseignante Doctorant, pour avoir accepté de diriger notre mémoire, et pour son soutien, ses précieux conseils et surtout sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier également le jury qui fera honneur de juger notre travail.

Nous remercions aussi Monsieur le directeur de la SETAM agence de Bouira d'avoir nous accueilli au sein de son organisme, ainsi que l'ingénieur de laboratoire Monsieur ABBAS .M pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail, ainsi que tout le personnel y travaille.

Nous souhaitons remercier nos collègues de travail et les amis de la promotion.

Nous tenons enfin à remercier nos familles pour leurs encouragements.

## **RESUME**

Avec un bon déroulement du processus de mise en œuvre, Le béton ordinaire, matériau le plus utilisé dans les chantiers de génie civil, présente des performances satisfaisantes, néanmoins ce matériau risque la ségrégation, phénomène définie par la perte d'homogénéité, qui peut être provoquée par une mauvaise composition, un temps de vibration excessif ou un malaxage insuffisant. L'étude de comportement mécanique du béton atteint par cette pathologie est l'objectif de notre travail. Dans le cadre de notre mémoire, des échantillons de plusieurs bétons ont été confectionnés avec un rapport E/C et temps de vibration variables, les éprouvettes des bétons sont soumises à une série d'essais destructifs et non destructifs (ultrasons, scléromètre) dans le but d'estimer leurs caractéristiques mécaniques.

Les résultats obtenus à l'issue des essais, montrent que les bétons présentant une ségrégation ont une résistance, une vitesse ultrasonique, un indice de rebondissement et un module d'élasticité faibles en comparaison avec un béton ordinaire.

**Mots-clés.** Béton, ségrégation, résistance, comportement mécanique.

# ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)

---

## ABSTRACT

With a smooth implementation process, the ordinary concrete, the most widely used in civil engineering projects material, this satisfactory performance, however, this risk material segregation phenomenon defined by the loss of homogeneity, which can be caused by poor composition, excessive vibration time or insufficient mixing. The mechanical behavior of concrete study reached by this pathology is the goal of our work. As part of our brief samples from several concretes were made with a W / C ratio and variable vibration time, the samples of concrete are subject to a series of destructive and non destructive tests (ultrasound, rebound) in the to estimate their mechanical characteristics.

The results obtained after the tests show that the concrete segregating have a resistance, ultrasonic speed, bouncing index and a low modulus of elasticity in comparison with ordinary concrete.

**Key words.** Concrete, segregation, resistance, mechanical behavior.

# ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)

## ملخص

مع عملية تنفيذ نحو سلس، الخرسانة العادية، مادة تستخدم على نطاق واسع في مشاريع الهندسة المدنية، لها أداء مرضي، لكن هذه المادة معرضة لظاهرة فصل المواد التي تعرف بفقدان التجانس، والتي يمكن أن تكون ناجمة عن ضعف التكوين، ووقت اهتزازات طويل أو غير كافية الاختلاط. دراسة السلوك الميكانيكي للخرسانة التي تعرضت لهذه الأمراض هو الهدف من عملنا. انجزت عدة عينات من الخرسانة لنسبة  $E/W$  ووقت اهتزاز متغير، هذه العينات من الخرسانة تخضع لسلسلة من الاختبارات المدمرة وغير المدمرة (الموجات فوق الصوتية، scléromètre) لتقدير خصائصها الميكانيكية.

وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها بعد الاختبارات أن الخرسانة المعرضة للفصل لديها مقاومة، سرعة الموجات فوق الصوتية، ومؤشر ارتداد ومعامل مرونة منخفضة مقارنة مع الخرسانة العادية.

مفاتيح الكلمات: الخرسانة، الفصل، المقاومة، السلوك الميكانيكي.

## **SOMMAIRE**

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b><u>Chapitre1 Notions générales sur le matériau béton</u></b>	
<b>I.1. Avant propos</b> .....	03
<b>I.2. Caractéristique des matériaux composants</b> .....	03
<b>I.2.1. Ciment</b> .....	03
a. La fonction liant.....	04
b. La fonction filler .....	04
c. La pâte du ciment .....	04
<b>I.2.2. Les granulats</b> .....	04
I.2.2.1. Caractéristiques géométriques des granulats .....	05
a. Dimension maximale.....	05
b. Classes granulaires .....	05
I.2.2.2 Facteur de choix des granulats .....	05
<b>I.2.3. L'eau de gâchage</b> .....	06
<b>I.2.4. Les adjuvants</b> .....	07
<b>I.2.4.1. classification des d'adjuvants</b> .....	07
<b>I.2.4.1.1 Adjuvants modifiant les propriétés physiques</b> .....	07
a. Hydrofuge de masse .....	07
b. Entraîneurs d'air .....	07
c. super plastifiants .....	07
<b>I.2.1.1.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement</b> .....	08
a. Accélérateurs de prise et durcissement .....	08
b. Retardateurs de prise : .....	08

# **ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)**

---

<b>I.2.5. Les additions minérales</b> .....	09
<b>I.3. Méthode de formulation des bétons</b> .....	09
<b>I.3.1.Méthodes classiques</b> .....	09
I.3.1.1. Méthode de Bolomey .....	09
I.3.1.2. Méthode de Dreux-Gorisse .....	10
I.3.1.3. Méthode de Faury .....	11
<b>I.3.2. Méthodes de formulation nouvelles</b> .....	12
<b>I.3.3. Méthodes de formulation numériques</b> .....	12
<b>I.4. le processus de mise en œuvre du béton</b> .....	13
<b>I.4.1. Le malaxage</b> .....	13
I.4.1.1. Temps de malaxage .....	13
<b>I.4.2. Transport du béton</b> .....	14
<b>I.4.3. Évacuation et mise en place du béton</b> .....	14
<b>I.4.4. Vibration du béton</b> .....	14
a. Vibration interne .....	14
b.vibration externe .....	15
c.La vibration de surface .....	15
<b>I.4.5. La cure du béton</b> .....	15
<b>I.5.Caractéristiques mécaniques de béton</b> .....	15
<b>I.5.1. Résistance caractéristique à la compression <math>f_{c28}</math>:</b> .....	15
<b>I.5.2.Résistance à la traction <math>f_{t 28}</math></b> .....	15
<b>I.6. Comportement mécanique du béton</b> .....	16
<b>I.6.1. Comportement du béton frais</b> .....	16

# ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)

---

<b>I.6.1.1. Propriétés des bétons à l'état frais</b> .....	16
<b>I.6.1.1.1.Ouvrabilité</b> .....	16
➤ <b>Mesure et contrôle de l'Ouvrabilité</b> .....	16
a. Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....	16
b. Essai vébé .....	18
c. Maniabilimètre L.C.P.C .....	18
<b>I.6.1.1.2.Théorie de l'excès de pâte</b> .....	19
<b>I.6.1.1.3. Ecoulement du béton frais</b> .....	19
<b>I.6.1.1.4.Viscosité</b> .....	20
<b>I.6.1.1.5.Seuil de cisaillement</b> .....	20
<b>I.7. Contrôle du comportement du béton durci</b> .....	21
I.7.1.Contrôle destructif .....	21
I.7.1.1.Comportement du béton en compression .....	21
a. Compression uni axiale .....	21
I.7.1.2. Comportement du béton en traction .....	22
a. Traction directe .....	22
b. Traction par fendage .....	23
c. Traction par flexion .....	23
<b>I.7.2. Contrôle non destructif.</b> .....	25
I.7.2.1. L'essai aux ultrasons .....	25
I.7.2.2. L'essai au scléromètre .....	26

**Chapitre II Revue bibliographique sur la ségrégation du béton**

<b>II. Revue bibliographique sur la ségrégation du béton</b> .....	27
<b>II.1. Avant -propos</b> .....	27
<b>II.2 caractérisation de la ségrégation</b> .....	27
II.2.1. Ségrégation externe .....	27
II.2.2. Ségrégation interne .....	28
<b>II.2.2.1. Ségrégation dynamique</b> .....	28
II.2.2.1.1.Essai à la boîte en L (L-Box) .....	28
II.2.2.1.2.Essai à la boîte en U ( U-Box) .....	28
II.2.2.1.3.Essai de stabilité au tamis .....	29
<b>II.2.2.2.Ségrégation statique</b> .....	30
<b>II.2.2.2.1.Béton traditionnel</b> .....	30
II.2.2.2.2.Méthode de comptage .....	31
II.2.2.2.3.Essai à la colonne (béton vibré) .....	32
<b>II.3.Caractérisation de la ségrégation interne par méthode non destructive</b> .....	33
II.3.1.Essai aux ultrasons .....	33
<b>II.3.2.Corrélation entre les différentes techniques de caractérisation de la ségrégation</b> 34	
II.3.2.1.Relation entre l'indice de ségrégation statique et la stabilité au tamis .....	34
II.3.2.2.Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'indice de ségrégation...34	
II.3.2.3.Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation .....	35

**Chapitre III Matériaux utilisés et méthodologie d'essais**

<b>III.1 .Introduction</b> .....	36
<b>III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés</b> .....	36
a)Le ciment .....	36
b) Les granulats.....	37
<b>III.3. Analyse granulométrique</b> .....	37
<b>III.4. Propriétés des granulats</b> .....	39
III.4.1. Masse volumique apparente.....	39
III.4.2. La masse volumique absolue .....	39
III.4.3. Module de finesse .....	40
<b>III.5. Propreté des granulats</b> .....	40
III.5.1.Équivalent de sable .....	40
c)Eau de gâchage .....	41
<b>III.6. Méthodologie expérimentale</b> .....	41
III.6.1. Formulation du béton selon la méthode de FAURY.....	41
III.6.1.1. Détermination de la composition du béton.....	42
<b>III.6.2. Confection des éprouvettes</b> .....	42
a) première série d'éprouvettes .....	42
b) deuxième série d'éprouvettes.....	43
c)troisième série d'éprouvettes .....	43
<b>III.6.3. Conservation et stockage des éprouvettes</b> .....	43
<b>III.7. Essais réalisés</b> .....	43

# ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)

---

III.7.1. Essai au scléromètre.....	44
III.7.2.Essai aux ultrasons.....	45
III.7.2.1.Mesures directes (en transparence).....	45
III.7.3.Essai de résistance à la compression .....	45

## **Chapitre IV présentations, analyse et discussion des résultats**

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>47</b>
<b>IV.2. Présentation des résultats .....</b>	<b>47</b>
IV.2.1. Résultats des essais au scléromètre.....	47
IV.2.1.1. Première série d'éprouvettes.....	47
IV.2.1.2.deuxième série d'éprouvettes.....	48
1) pour $t= 20s$ et $E/C=0.56$ .....	48
2) pour $t= 25s$ et $E/C=0.56$ .....	49
3) pour $t= 30s$ et $E/C=0.56$ .....	50
4) pour $t= 35s$ et $E/C=0.56$ .....	51
5) pour $t= 45s$ et $E/C=0.56$ .....	52
IV.2.1.3.La troisième série.....	54
1)pour $t= 13s$ et $E/C=0.60$ .....	54
2)pour $t= 13s$ et $E/C=0.65$ .....	55
3)pour $t= 13s$ et $E/C=0.70$ .....	56
4) pour $t= 13s$ et $E/C=0.75$ .....	57
5) pour $t= 13s$ et $E/C=0.80$ .....	58
<b>IV.2.2.Résultats d'essai aux ultrasons.....</b>	<b>60</b>
IV.2.2.1.Première série d'éprouvettes.....	60
IV.2.2.2.Deuxième série d'éprouvettes.....	60

# ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)

---

IV.2.2.3.Troisième série d'éprouvettes .....	61
<b>IV.2.3.Résultats d'essai de résistance à la compression .....</b>	<b>62</b>
IV.2.3.1.Première série d'éprouvettes.....	62
IV.2.3.2.Deuxième série d'éprouvettes .....	63
IV.2.3.3.Troisième série d'éprouvettes.....	64
<b>IV.3. Contrôle du béton par la méthode combinée .....</b>	<b>65</b>
IV.3.1.Resistance à la compression .....	66
<b>IV.3.2.Détermination des propriétés des mélanges.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.3.2.1.Module d'élasticité .....</b>	<b>67</b>
IV.3.2.1.1.Module d'élasticité dynamique.....	67
IV.3.2.1.2.Module d'élasticité statique.....	70
<b>IV.4.Analyse et discussion des résultats .....</b>	<b>72</b>
IV.4.1.indice de rebondissement .....	72
IV.4.2.Vitesse des ultrasons .....	72
IV.4.3.Resistance à la compression.....	72
IV.4.4.module d'élasticité.....	73
IV.5.Conclusion .....	73
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>74</b>
<b>Perspectives et recommandations.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>75</b>

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre I Notions générales sur le matériau béton**

<b>Figure 1.1.</b> Influence de rapport E/C sur la résistance du béton.....	06
<b>Figure I. 2:</b> L'influence des superplastifiants [Dreux G., Fiesta J., 1998].....	08
<b>Figure I. 3:</b> courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse.....	10
<b><u>Figure. I.4.</u></b> aiguille Vibration interne.....	14
<b>Figure I.5. :</b> Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	17
<b>Figure I.6. :</b> Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	17
<b>Figure. I.7:</b> Essai vété.....	18
<b>Figure. I.8:</b> Maniabilimètre L.C.P.C.....	19
<b>Figure. I.9.</b> -dispersion des granulats par excès de pate.....	19
<b>Figure I.10.</b> Relation entre affaissement et viscosité plastique.....	20
<b>Figure I.11.</b> Relation entre affaissement et seuil de cisaillement.....	21
<b>Figure I.12.</b> – Phases du comportement en compression du béton.....	21
<b>Figure 1.13.</b> Essai de traction directe .....	23
<b>Figure 1.14.</b> Essai de traction fendage .....	23
<b>Figure I.15.</b> Essai de traction par flexion 3 points (a) et la relation entre la charge P et la flèche V .....	24
<b>Figure. I.16 :</b> Schéma du diagramme du circuit de la vitesse de propagation .....	26
<b>Figure. I.17.</b> scléromètre .....	26
<b>Figure. I.18 :</b> principe du fonctionnement du scléromètre.....	26

## **Chapitre II Revue bibliographique sur la ségrégation du béton**

<b>Figure II.1.</b> Ségrégation externe du béton.....	27
<b>Figure II.2.</b> Essai à la boîte en L (L-Box) .....	28
<b>Figure II.3.</b> Essai à la boîte en U (U-Box).....	29
<b>Figure II.4.</b> Essai au tamis .....	29
<b>Figure II.5.</b> Dispositif Expérimental utilisé par (Sidky, Legrand et Barrioulet).....	30
<b>Figure II.6.</b> Cylindre d'échantillonnage et détermination de la résistance à la ségrégation « f .....	31
<b>Figure II.7:</b> différentes étapes de l'essai de mesure de l'indice de ségrégation statique.....	32
<b>Figure II.8.</b> Essai de stabilité à la colonne.....	32
<b>Figure II.9.</b> Détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons « fu ».....	33
<b>Figure II.10:</b> Relation entre la stabilité au tamis et l'indice de ségrégation.....	34
<b>Figure II.11 :</b> Relation entre le temps d'écoulement et l'indice de ségrégation .....	35
<b>Figure II.12:</b> Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation.....	35

## **Chapitre III Matériaux utilisés et méthodologie d'essais**

<b>Figure-III.1-</b> marquage sur le sac du ciment.....	36
<b>Figure. III.2.</b> Courbe granulométrique.....	39
<b>Figure III.3.</b> Équivalent de sable.....	40
<b>Figure.III.4.</b> éprouvettes à tester.....	43
<b>Figure III.5. :</b> Points de mesure sur éprouvettes.....	44
<b>Figure III.6. :</b> Essai au scléromètre.....	44

# ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)

---

**Figure III.7** : essai aux ultrasons.....45

**Figure III.8** : Machine de compression.....46

## **Chapitre IV Présentation des résultats**

**Figure. IV .1.** Indice R pour  $t= 20s$  et  $E/C=0.56$ .....48

**Figure IV.2.** Indice R pour  $t= 25s$  et  $E/C=0.56$ .....49

**Figure .IV.3.** Indice R pour  $t= 30s$  et  $E/C=0.56$ .....50

**Figure IV.4.** indice R pour  $t= 35s$  et  $E/C=0.56$ .....51

**Figure IV.5.** Indice R pour  $t= 45s$  et  $E/C=0.56$ .....52

**Figure IV.6.** Indice  $R= f(t ; E/C=0.56)$ .....53

**Figure IV.7.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.60$ .....54

**Figure IV.8.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.65$ .....55

**Figure IV.9.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.70$ .....56

**Figure IV.10.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.75$ .....57

**Figure IV.11.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.80$ .....58

**Figure IV.12.** Indice  $R = f(t= 13s \text{ et } E/C)$  .....59

**Figure. IV. 13** Représentation schématique de la ségrégation par sédimentation.....59

**Figure IV.14.** vitesse de son  $V = f(t ; E/C=0.56)$ .....61

**Figure IV.15.** vitesse  $V = f(t= 13s \text{ et } E/C)$  .....62

**Figure IV.16.** Résistance à la compression  $R_c = f(t ; E/C=0.56)$ .....63

**Figure IV.17.** Mode de rupture d'éprouvette pour  $t > 20s$ .....64

**Figure IV.18.** Résistance à la compression  $R_c = f(t=13s ; E/C)$ .....65

**Figure. IV.19.** mode de rupture d'éprouvette  $E/C > 0.65$ .....65

**ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE  
PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)**

---

**Figure IV.20.** Résistance à la compression  $R_c = f(t ; E/C)$ .....65

**Méthode combinée**

**Figure IV.21.** : Courbe d'estimation de la résistance à la compression par utilisation  
conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au  
scléromètre selon U. Bellander (1977).....66

**Figure. IV.18** module d'élasticité.....71

**LISTE DES TABLEAUX**

**Chapitre I Notions générales sur le matériau béton**

<b>Tableau I.1.</b> moyen de mettre en place le béton en fonction de la consistance.....	14
<b>Tableau I.2.</b> Consistance du béton en fonction de l'affaissement.....	17
<b>Tableau I.3</b> classe de consistance vété. De V0 à V4. De ferme à fluide [Cimbéton, 2006]...18	

**Chapitre III Matériaux utilisés et méthodologie d'essais**

<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques physiques du ciment employé.....	36
<b>Tableau III.2.</b> Propriétés mécaniques du ciment S.E.G.....	36
<b>Tableau III.3.</b> Analyse minéralogique du ciment employé.....	37
<b>Tableau III.4.</b> Analyse chimique de ciment employé.....	37
<b>Tableau III.5.</b> Résultats d'analyse granulométrique.....	38
<b>Tableau III.6.</b> Propriétés des granulats.....	41
<b>Tableau III.7.</b> composition de 1 m <sup>3</sup> de béton.....	42

**Chapitre IV présentations, analyse et discussion des résultats**

<b>Tableau IV.1.</b> Indice R = f (t ; E/C =0.56).....	47
<b>Tableau IV.2.</b> Indice R pour t= 20s et E/C=0.56.....	48
<b>Tableau IV.3.</b> Indice R pour t= 25s et E/C=0.56.....	49
<b>Tableau IV.4.</b> Indice R pour t= 30s et E/C=0.56.....	50
<b>Tableau IV.5.</b> Indice R pour t= 35s et E/C=0.56.....	51
<b>Tableau IV.6.</b> Indice R pour t= 45s et E/C=0.56.....	52

## **ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)**

---

<b>Tableau .IV.7.</b> Indice R pour $t= 13s$ et $E/C=0.60$ .....	54
<b>Tableau IV.8.</b> Indice R pour $t= 13s$ et $E/C=0.65$ .....	55
<b>Tableau .IV.9.</b> Indice R $t= 13s$ et $E/C=0.70$ .....	56
<b>Tableau .IV.10.</b> Indice R $t= 13s$ et $E/C=0.75$ .....	57
<b>Tableau IV.11.</b> Indice R pour $t= 13s$ et $E/C=0.80$ .....	58
<b>Tableau IV.12.</b> vitesse de son $V= f(t; E/C =0.56)$ .....	60
<b>Tableau IV.13.</b> vitesse de son $V =f (t ; E/C=0.56)$ .....	60
<b>Tableau .IV.14.</b> vitesse de son $V = f(E/C ;t=13s$ .....	61
<b>Tableau IV.15.</b> Résistance à la compression $R_c = f(t ; E/C=0.56)$ .....	62
<b>Tableau. IV.16.</b> Résistance à la compression $R_c = f(t ; E/C=0.56)$ .....	63
<b>Tableau .IV.17.</b> Résistance à la compression $R_c = f(E/C ;t=13s)$ .....	64

### **Méthode combinée**

<b>Tableau .IV.18.</b> Résistance du béton pour $t$ variable.....	66
<b>Tableau. IV.19.</b> Résistance du béton pour $E/C$ variable.....	67
<b>Tableau IV.20</b> masse volumique du béton ( $t$ variable).....	68
<b>Tableau .IV.21.</b> Masse volumique du béton ( $E/C$ variable).....	68
<b>Tableau. IV.22.</b> Module d'élasticité dynamique ( $t$ variable).....	69
<b>Tableau. IV.23.</b> Module d'élasticité dynamique ( $E/C$ variable).....	69
<b>Tableau .IV.24.</b> Module d'élasticité statique ( $t$ variable).....	70
<b>Tableau .IV.25</b> module d'élasticité statique ( $E/C$ variable).....	71

**ETUDE DES PROPRIETES ET COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN BETON DEGRADE  
PAR SEGREGATION (CAS DE BETON ORDINAIRE)**

---

# ***Introduction générale***

---

## INTRODUCTION GENERALE :

La grande diversité des bétons, tant du point de vue propriétés d'écoulement ou caractéristiques mécaniques permettent à ces matériaux d'être présents dans tous les domaines du génie civil. En effet, leur mise en place, performances mécaniques ainsi que leur durabilité ont contribué à accroître leurs champs d'utilisation.

L'état frais du béton est très délicat. Le matériau doit assurer une facilité de mise en œuvre ainsi qu'une grande capacité de remplissage. Une attention particulière accompagnée d'une étude approfondie sont nécessaires pour produire un béton de qualité, fournissant les caractères rhéologiques visés à savoir : un béton homogène, stable et uniforme.

En effet, sur chantier il est parfois difficile de garantir les performances exigées, des défauts de mise en œuvre : formulation non respectée, un excès ou un manque de vibration peuvent être à l'origine d'une ségrégation importante.

L'objectif de ce présent travail est de mettre en évidence les paramètres qui peuvent être à l'origine de la ségrégation du béton ordinaire. En vue d'étudier l'influence des différents paramètres, paramètre lié à la formulation du béton (E/C) et un autre paramètre lié à sa mise en place (le temps de vibration), l'approche consiste à varier un seul paramètre et mesurer son effet sur le comportement du béton en maintenant l'autre paramètre constant.

Trois séries de formulations ont été effectuées dans le but d'estimer la résistance mécanique à la compression, le module d'élasticité et la masse volumique de béton à l'état durci.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Après une introduction générale, **le premier chapitre** présente une synthèse bibliographique sur le matériau béton, il présente aussi les détails relatifs aux constituants du béton et les méthodes de formulation, le comportement du béton à l'état frais et durci ainsi que les méthodes de contrôle non destructives du béton.

**Le deuxième chapitre** traite les différentes méthodes de caractérisation de la ségrégation du béton à l'état frais et durci.

**Le troisième chapitre** est consacré à la présentation des matériaux utilisés, la formulation du béton et la démarche méthodologique des essais.

## INTRODUCTION GENERALE

---

**Le quatrième chapitre** présente les résultats expérimentaux de différents bétons, ce chapitre est consacré également à une analyse des résultats obtenus. Enfin, une conclusion générale sur notre travail ainsi que des recommandations ont été faites clôture ce mémoire de fin d'études.

## ***Chapitre I***

# ***Notions générales sur le matériau béton***

---

## **I. Notions générales sur le matériau béton**

### **I.1. Avant propos**

Le matériau béton est un matériau composite hétérogène, résulte d'un mélange de ciment, de granulats, d'eau, et éventuellement quelques proportions d'adjuvant et additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton [El Barrak, 2005].

il présente des propriétés mécaniques très supérieures à celles des matériaux composant prises séparément .

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et l'eau de gâchage, afin de réaliser un béton répondant aux qualités recherchées.

Généralement, les méthodes de formulations ne considèrent que l'affaissement et la résistance à la compression à 28 jours comme critères de caractérisation [6].

A cet effet, préalablement à la détermination des dosages des constituants, il est recommandé de vérifier certaines propriétés et caractéristiques des matériaux composants. Enfin, une fois le béton préparé, il doit subir des essais à l'état frais et durci, afin de matérialiser le matériau et donc confectionner des ouvrages résistants, durables et économiques.

### **I.2. Caractéristiques des matériaux composants**

#### **I.2.1. Ciment**

Le ciment est un liant hydraulique, il se présente sous forme d'une poudre très fine formant avec l'eau une pâte faisant prise et durcissant dans le temps [11].

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut noter que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

## **a. La fonction de liant**

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement [4]. La structure poreuse (pores capillaires interconnectés) de la pâte et sa solution interstitielle (teneur en ions alcalins) sont les paramètres de sa durabilité [7].

## **b. La fonction filler :**

Le ciment remplit les interstices les plus fins entre les grains de sable donc il complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires [4], contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

**c. La pâte du ciment** : correspond à l'ensemble (ciment + eau + air + additions+ adjuvants). Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité [18]. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension des particules suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau.

## **I.2.2. Les granulats**

Les granulats sont définis comme l'ensemble des grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sables, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle

[NF P 15-010].

Les granulats jouent un rôle important dans le comportement du béton et ils constituent (70%) du volume qui constitue le squelette dont ils conditionnent les caractéristiques [11]. Leur influence est très forte en termes de performances mécaniques. En effet, ceux-ci présentent de meilleures caractéristiques mécaniques que la pâte de ciment. Pour obtenir un béton ayant de bonnes caractéristiques, plusieurs paramètres entrent en jeu dans le choix des granulats : la qualité, la minéralogie, la forme et une granulométrie appropriée.

## **I.2.2.1. Caractéristiques géométriques des granulats**

Généralement, l'usage des granulats roulés dans la technologie classique du béton est préféré à celui des granulats concassés, car ils sont supposés conférer une meilleure maniabilité au béton [11]. En revanche, les granulats concassés sont réputés développer une meilleure liaison avec la pâte de ciment ([Akçaoglu et al., 2002] [Rao et Prasad, 2002] [Azimah, 2007] [Lo et al., 2008] [Cnudde et al., 2009] [Munoz et al., 2010]).

### **a. Dimension maximale**

La dimension maximale  $D_{max}$  des granulats est en générale de 25 mm .En effet, plus la taille maximale des granulats augmente, plus le risque du blocage par les armatures augmente

Cette dimension doit être compatible avec les exigences géométriques de l'ouvrage (espacement des armatures, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler).

### **b. Classes granulaires**

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs, leur classe est définie par tamisage [11]. La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/5 et un gravillon 8/15 ; 15/25, par exemple. On peut également utiliser d'autres classes de granulats dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes.

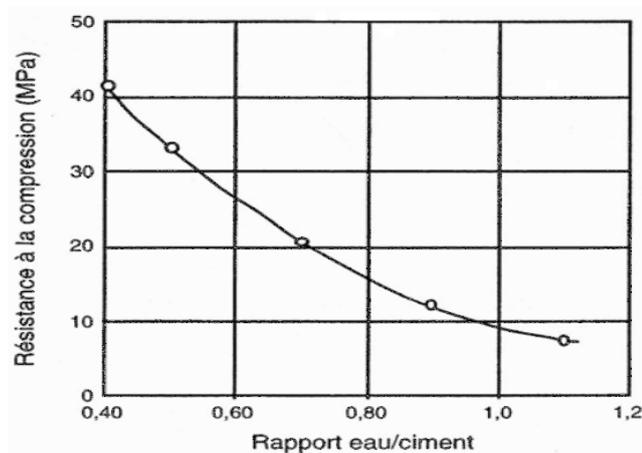
## **I.2.2.2 Facteurs de choix des granulats**

Pour le choix des granulats pour le béton deux facteurs sont considérés :

- le facteur  $G/S$  « proportion relative gravillons/sable », il doit être inférieur à 2 ;
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

### I.2.3. L'eau de gâchage

L'eau est un des constituants de base du béton. La moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats) laisse des vides qui influent sur la porosité du béton. En augmentant la quantité d'eau, la concentration en solide diminue, et le béton devient fluide: son seuil de cisaillement et sa viscosité plastique diminuent [14]. Cependant, en plus de diminuer la résistance mécanique du béton mature, l'introduction excessive d'eau provoque des problèmes de ségrégation.



**Figure 1.1.** Influence de rapport E/C sur la résistance du béton.

Elle est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée. Les catégories présentées ci-dessous, issues d'anciens travaux [Baron et Sauterey, 1982] [Guénot-Delahaie, 1997], décrivent les différents types d'eau évaporables selon la force de la liaison :

- L'eau libre et capillaire : elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimensions supérieures à 10  $\mu\text{m}$  (gros pores et fissures).
- L'eau adsorbée : l'eau est adsorbée sur les parois des surfaces externes des particules.
- L'eau chimiquement combinée : elle réagit chimiquement avec le ciment pour former un nouveau produit, comme les C-S-H. silicates de calcium hydratés.

## **I.2.4. Les adjuvants**

L'emploi d'adjuvant qui était destiné aux bétons spéciaux devient de plus en plus utilisé dans la composition classique du béton. Ils sont introduits avec de faible pourcentage pour améliorer les propriétés du béton selon certaines exigences d'utilisation: la fluidité, la résistance, le temps de durcissement, l'imperméabilité...., [Dupain, Lanchon, Saint-Arroman, 2000.

### **I.2.4.1. classification des adjuvants:**

#### **I.2.4.1.1 Adjuvants modifiant les propriétés physiques:**

##### **a. Hydrofuge de masse :**

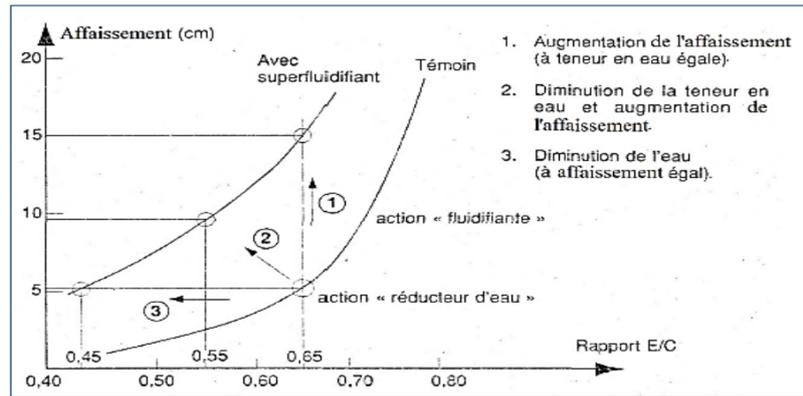
Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons durcis, ce qui procure une bonne étanchéité aux matériaux. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés. Ils peuvent également comporter des matières fines ainsi que des agents fluidifiants [4].

##### **b. Entraîneurs d'air :**

Le rôle des entraîneurs d'air est d'incorporer des millions de petites bulles d'air d'un diamètre compris entre 10 et 300  $\mu\text{m}$  dans le béton afin d'augmenter la résistance aux cycles de gel - dégel. Il en résulte également une amélioration de l'ouvrabilité et une diminution du ressuage.

##### **c. Superplastifiants:**

Les superplastifiants permettent de défloculer les grains de ciment. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place.



**Figure I. 2:** L'influence des superplastifiants [Dreux G., Fiesta J., 1998]

### **I.2.1.1.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement:**

Ces adjuvants sont des produits chimiques, qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution du seuil de cisaillement dans le temps, en fonction de l'adjuvant utilisé [4].

#### **a. Accélérateurs de prise et de durcissement :**

Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement avancent le début de prise ou accélèrent le processus de durcissement en libérant la chaleur d'hydratation plus rapidement. L'hydratation étant plus rapide, le béton peut être décoffré avant 28 jours. L'effet des accélérateurs dépend beaucoup de leur composition chimique et de celle du ciment utilisé. Les accélérateurs entraînent souvent une perte plus ou moins importante de la résistance finale du béton. Ces adjuvants peuvent avoir une influence majeure sur les caractéristiques du béton frais et durci.

#### **b. Retardateurs de prise :**

Les retardateurs de prise ont pour effet de retarder le début de la prise du ciment et de prolonger ainsi le délai de transport et mise en place du béton. Leurs applications principales sont les suivantes :

- bétonnage par temps chaud
- transport du béton sur de longues distances
- bétonnage de gros volumes ou de grandes surfaces.

## **I.2.5. Les additions minérales:**

Pendant la formulation d'un béton, différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton [El Barrak, 2005]. Ces additions peuvent être introduites au ciment pendant sa fabrication.

## **I.3. Méthode de formulation des bétons:**

Les formulateurs ont proposé, autre que les méthodes classiques, de nouvelles approches de formulation. Ci-après quelques méthodes utilisées dans la formulation des bétons.

### **I.3.1.Méthodes classiques:**

#### **I.3.1.1. Méthode de Bolomey:**

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) ; dont la courbe soit la plus proche que possible de la courbe de référence théorique [Dreux, Festa, 1998]. La formule de base est la suivante :

$$P=A + (100-A) \sqrt{d/D} \quad .$$

Avec :

P : Le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

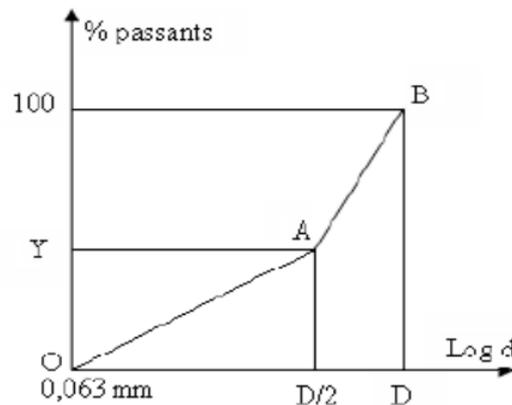
d : Le diamètre du plus petit granulat.

D : Le diamètre du plus gros granulat.

'A' varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

## I.3.1.2. Méthode de Dreux-Gorisse:

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique. Sur la base d'une analyse statistique d'un grand nombre de bétons **Dreux** a mené une large enquête [De Larrard, 2000]. En combinant les courbes granulaires obtenues, il a pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique (figure I.4).



**Figure I. 3:** courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse.

Sur un graphe d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), on trace une composition granulaire de référence OAB . Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D des plus gros granulats, c'est-à-dire :

Point B ( $X = D_{max}$  et  $Y = 100\%$ )

Point O ( $X = 0.063$  et  $Y = 0$ )

Le point de brisure A aux coordonnées suivantes :

En abscisses (à partir de la dimension D du tamis)

Si :  $D \leq 20$  mm ; l'abscisse est  $D/2$ .

Si :  $D \geq 20$  mm l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38(5 mm) et le module correspondant à D.

En ordonnées :  $y = 50 - \sqrt{D} + K$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats et également du module de finesse du sable.

Une correction supplémentaire sur K peut être effectuée (cas de sable grossier) en la valeur  $K_s = 6M_f - 15$  ou  $M_f$  étant le module de finesse du sable qui varie de 2 à 3 [Dreux et Festa, 1998].

### **I.3.1.3. Méthode de Faury:**

Cette méthode s'inspire de la théorie de Caquot. Faury prend comme échelle :

- **En abscisse** :  $5\sqrt{d}$

- **En ordonnée** : la décimale suivant le pourcentage en volume absolu de matière passant à travers les passoires correspondantes.

La courbe de référence à suivre se compose de deux tronçons de droite.

- La première donne la granulométrie des grains fins et moyens  $0/D/2$ . Cette droite coupe l'axe des abscisses en un point fixe d'abscisse  $d_0 = 0,0065$ .
- La deuxième droite est celle de gros grains  $D/D/2$ .

. L'ordonnée Y, appelée point de brisure, indique le pourcentage en volume des grains  $0/D/2$

Sa valeur est donnée par la formule expérimentale.

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

D : grosseur maximum de l'agrégat en mm.

R : rayon moyen du coffrage en mm.

A : coefficient tenant compte de la forme des agrégats et de la consistance du béton.

B : dépend du serrage. Il varie de 1 pour une vibration puissante à 1,5 pour un serrage moyen.

## I.3.2. Méthodes de formulation nouvelles:

En 1996, **Baron et Ollivier** développent une méthode de formulation dérivée de celle de **Dreux Gorisse** avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Cette méthode permet d'englober un grand nombre de paramètres« en plus de la prise en compte des adjuvants et l'incorporation d'additions minérales, de nouveaux paramètres sont visés ». La durabilité du matériau dans son environnement de service est un critère essentiel.

En 2004, l'**AFGC**<sup>1</sup> propose une méthodologie pour la mise en œuvre d'une démarche performantielle, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton, basée sur la notion d'indicateur de durabilité. Cette approche combine des mesures en laboratoire et des codes de calcul. En marge de ces méthodes réelles de formulation, des approches d'optimisation sont utilisées.

L'approche dite du **Mortier de Béton Equivalent (MBE)** est une nouvelle méthode qui aide à formuler les bétons adjuvantés [SCH, 2000]. Le principe de la méthode repose sur le fait qu'il existe une corrélation reliant les propriétés rhéologiques d'un béton à celle du mortier qui le compose [SCH, 2000]. Cette méthode permet de pouvoir tester efficacement à l'état frais certains couples de constituants (ciment / adjuvant).

## I.3.3. Méthodes de formulation numériques:

Des méthodes de formulation novatrices utilisant des modèles numériques (logiciels) émergent : **René LCPC, BétonLab et BétonLab Pro2**, etc.

**De Larrard** (2000) fait intervenir des notions nouvelles comme le serrage, l'effet de paroi et l'effet de desserrement à travers le **Modèle d'empilement compressible (MEC)**.

Ces méthodes ont pour avantage l'obtention instantanée des caractéristiques du béton, ainsi qu'une prévision fidele des résultats expérimentaux. [F. de Larrard, T. Sedran] (LCPC).

---

<sup>1</sup> AFGC Association Française de Génie Civil

## I.4. le processus de mise en œuvre du béton:

### I.4.1. Le malaxage:

Cette opération consiste à assurer un béton homogène et que tout ses granulats soient bien enrobés du liant [**DTR BE 2.1 2010**<sup>2</sup>]. La séquence d'introduction des différents matériaux doit respecter la norme (EN 12390-2 et DTR BE 2.1 2010)

En pratique, l'homogénéisation des différents constituants, peut ne pas être assurée si les temps de mélange ou les procédures d'introduction des constituants ne sont pas respectés. On comprend l'importance primordiale de cette étape : il n'est pas suffisant d'avoir la bonne composition de béton si on ne se donne pas les moyens d'assurer son homogénéité en fin de malaxage [15].

#### I.4.1.1. Temps de malaxage

Le temps du malaxage est un paramètre très important pour l'homogénéisation du béton. Il dépend de type de l'équipement de malaxage ainsi que de type de béton, selon la norme algérienne [**DTR BE 2.1 2010**] le temps de malaxage pour les bétons ordinaires ne doit pas être inférieur à 2 minutes.

La mise au point de nouveaux bétons : bétons à hautes performances (BHP), bétons auto nivelants (BAN), bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra performants (BFUP)... demande des temps de malaxage très élevés pouvant parfois dépasser 5 minutes [15].

En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air « piégés ». Ceci accroît donc la densité et la compacité du béton.

Un malaxage trop long et une vitesse de rotation du malaxeur trop longue peuvent conduire à une dégradation des propriétés du matériau et à une ségrégation des constituants [11], [15].

---

<sup>2</sup> **DTR BE 2.1 2010** Document Technique Réglementaire.

## I.4.2. Transport du béton:

Cela concerne les bétons préparés en centrale à béton, le transport au chantier se fait par des camions toupies assurant l'agitation du mélange et éviter toute ségrégation.

## I.4.3. Évacuation et mise en place du béton

Il y a plusieurs moyens pour mettre le béton en place, par gravité pour le béton auto plaçant, par compression directe du matériau au moyen d'un outil, et le plus fréquent consiste à soumettre le béton frais à une vibration [5].

Affaissement cm	0-2	1-4	5-25	$\geq 25$ $60 \leq \text{étalement} \leq 70$
Action	Compactage énergique (+vibration)	Compactage léger (+vibration)	Gravité +vibration seule	gravité

**Tableau I.1.** moyen de mettre en place le béton en fonction de la consistance [5]

## I.4.4. Vibration du béton

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction de favoriser l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton et à pour effet de casser le réseau de contacts entre les agrégats et faciliter l'écoulement du matériau [5]. Le béton obtenu présente une compacité plus forte, avec moins de vides d'air (effets de serrage). Par conséquent, il est possible de faire des bétons avec un taux d'eau de gâchage plus faible, ce qui a pour effet de diminuer leur porosité, d'accroître leurs caractéristiques mécaniques et leur durabilité et d'améliorer leur aspect de surface [4]. Il existe trois types de vibration

a. **Vibration interne** (pervibration) Vibration transmise directement dans la masse du béton par des aiguilles vibrantes



**Figure. I.4.** aiguille Vibration interne

**b. vibration externe.** Vibration transmise au béton par le coffrage ou par le moule, elle est utilisée quand la densité des armatures à l'intérieur des coffrages est trop importante et pour le béton préfabriqué, elle se fait par fixation des vibrateurs sur les coffrages.

**c. La vibration de surface** : Vibration transmise directement au béton par sa surface au moyen d'une règle vibrante, utilisée pour le serrage d'éléments horizontaux de faible épaisseur (15 à 20 cm au maximum). Telles les dalles de béton, les couches de roulement

## **I.4.5. La cure du béton**

La cure du béton sur les surfaces non coffrées et les surfaces après décoffrage permet d'obtenir d'une part de bonnes caractéristiques de surface grâce à une hydratation correcte de la peau du béton et de limiter d'autre part la microfissuration engendrée par le retrait plastique et le retrait de dessiccation à jeune âge.

## **I.5. Caractéristiques mécaniques du béton**

### **I.5.1. Résistance caractéristique à la compression $f_{c28}$ :**

Le béton est connu pour sa bonne résistance à la compression, son comportement dépend d'un grand nombre de paramètres tels que la qualité et le dosage des matériaux et les conditions de réalisation.

$$f_{cj} = (j/4.76 + 0.83j) f_{cj28} \quad \text{pour} \quad f_{cj28} \leq 40 \text{ MPa} \quad [\text{BAEL}]$$

Les bétons couramment utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil tels que les bâtiments, les ponts, les murs de soutènement...etc, présentent des résistances à la compression  $f_{c28}$  variant de 20 à 50 MPa.

### **I.5.2. Résistance à la traction $f_{t28}$**

Le béton présente une faible résistance à la traction. On trouve que le rapport entre la résistance directe  $f_{t28}$  et la résistance en compression  $f_{c28}$  du béton varie de 0.05 à 0.1.

La résistance à la traction est donnée par la formule suivante

$$f_t = 0.6 + 0.06 f_{cj} \quad f_{cj} < 60 \text{ MPa} \quad [\text{BAEL}]$$

## **I.6. Comportement mécanique du béton**

Dans cette partie de chapitre, un résumé des différents essais caractérisant le comportement mécanique du béton sera présenté, basé sur les résultats publiés par différents auteurs dans la littérature.

### **I.6.1. Comportement du béton frais**

#### **I.6.1.1. Propriétés des bétons à l'état frais**

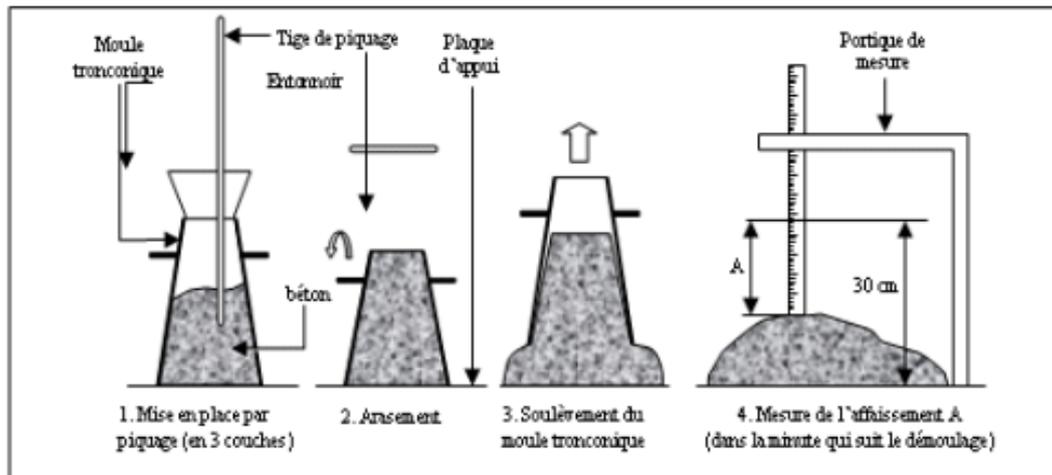
##### **I.6.1.1.1. Ouvrabilité :**

L'ouvrabilité est la qualité première et essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage mais également ses performances à l'état durci, elle est définie aussi comme la propriété déterminant l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité du béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité . De l'ouvrabilité dépendent la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton, enrobage et adhérence des armatures. Cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation [11]. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés.

##### **➤ Mesure et contrôle de l'Ouvrabilité :**

##### **a. Essai d'affaissement au cône d'Abrams**

Le moyen utilisé pour le contrôle de l'ouvrabilité du béton est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams , il s'agit de constater l'affaissement du béton sous l'effet de son poids propre. Selon la norme [NF P 18 -451], l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ( $D = 20 \text{ cm}$ ,  $d = 10 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Cet essai permet de caractériser la consistance d'un béton frais [6].



**Figure I.5.** : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Le tableau suivant résume les classes de consistance.

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide Fl	≥16	

**Tableau I.2.** Consistance du béton en fonction de l'affaissement. [11]

Pour les bétons fluides (BAP ; BAN...) on parle plutôt de l'étalement car leur affaissement étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue [3].



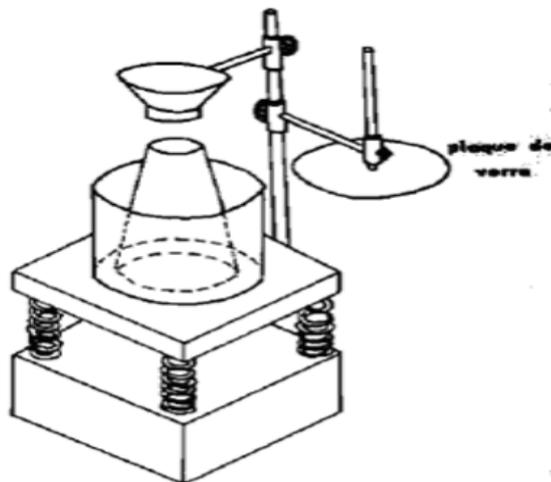
**Figure I.6.** : Essai d'étalement au cône d'Abrams

## b. Essai vété [NF EN 12350-3]

Cet essai est utilisé pour tester les bétons de faible ouvrabilité, il consiste en la mesure du temps nécessaire que met un cône de béton à remplir un volume connu, sous l'effet d'une vibration donnée [Cimbéton, 2006].

Classe vété	V0	V1	V2	V3	V4
Temps à l'essai vété	>31 s	30 s à 21 s	20 s à 11 s	10 s à 5 s	< 5 s

**Tableau I.3.:** classe de consistance vété. De V0 à V4. De ferme à fluide [Cimbéton, 2006]



**Figure.I.7:** Essai vété

## c. Maniabilimètre L.C.P.C.

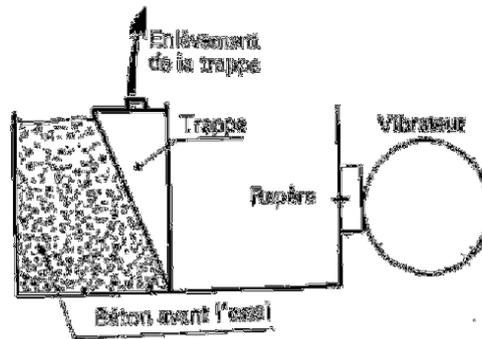
Le maniabilimètre L.C.L. [Baron, 1982] fonctionne sur le même principe que l'essai vété, et la vibration est déclenchée lorsque l'on retire la trappe. L'ouvrabilité du béton est donnée en fonction du temps comme suit [11].

$t \leq 10$  secondes, béton mou et très fluide.

$t \approx 15$  secondes, béton très plastique.

$20 \leq t \leq 30$  secondes, béton de bonne ouvrabilité.

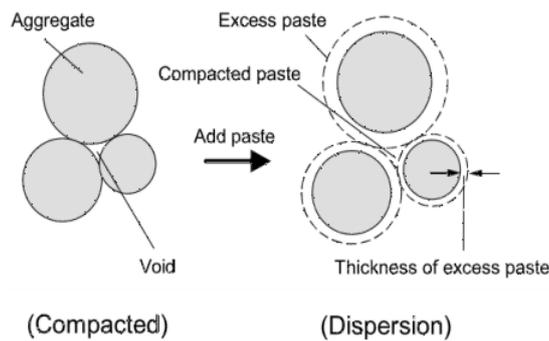
$t \geq 40$  secondes, béton sec.



**Figure. I.8.** Maniabilimètre L.C.P.C.

### I.6.1.1.2. Théorie de l'excès de pâte

**Kennedy** a proposé, vers 1940, une théorie permettant de comprendre l'origine de l'ouvrabilité d'un béton, le volume de pâte peut être divisé en un volume de pâte qui va remplir les vides résiduels du squelette granulaire, plus un volume de pâte qui va créer une certaine dispersion des granulats [4] et confère au matériau son ouvrabilité. Un concept de couche de pâte autour des granulats a d'ailleurs été adopté pour prendre en compte ces effets [14],[9]. C'est à ce niveau qu'intervient la notion de compacité optimale du squelette granulaire. En effet, le volume de pâte de remplissage est d'autant plus faible que le squelette granulaire est compact.



**Figure. I.9.** -dispersion des granulats par excès de pâte

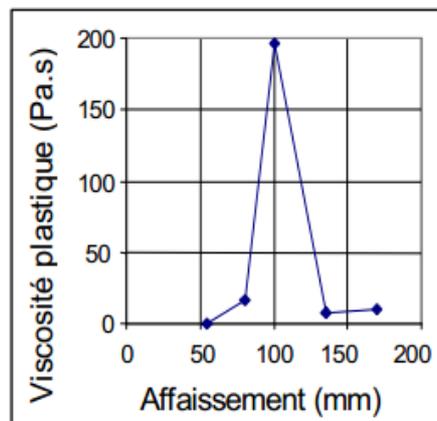
### I.6.1.1.3. Ecoulement du béton frais

D'un point de vue physique, les bétons à l'état frais peuvent être considérés comme des suspensions de grains de différentes tailles dans un fluide [19].

Les bétons et, en général, les matériaux cimentaires ont, à l'état frais, pour caractéristique mécanique principale d'avoir un seuil de contrainte : ils ne s'écoulent que si on leur applique une contrainte suffisamment forte [12]. La caractérisation de la capacité à s'écouler des bétons à l'état frais afin de prédire la mise en œuvre du matériau sur chantier ou en usine de préfabrication a fait l'objet de nombreuses études (Roussel N. et Coussot P, 2006). Les études expérimentales ont montré que la masse des granulaires a un effet important sur l'écoulement du béton frais vibré. L'écoulement est d'autant facile que la masse des granulats est plus élevée.

### I.6.1.1.4 Viscosité

La viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement du matériau. D'une manière générale, la viscosité d'un béton augmente quand sa concentration en inclusions solides augmente [19]. la viscosité du matériau permet d'entraîner correctement les granulats lors de l'écoulement [3]. pour les bétons fluides cette caractéristique doit être suffisamment faible pour que le matériau s'écoule avec un débit relativement important [3].

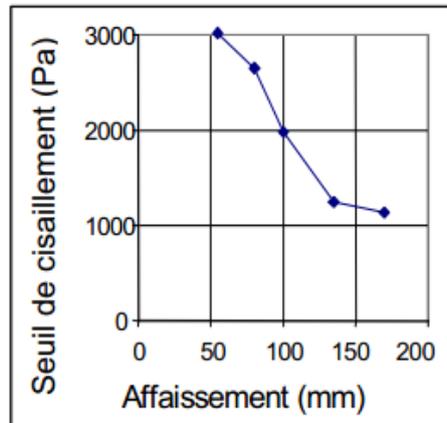


**Figure I.10.** Relation entre affaissement et viscosité plastique [6]

### I.6.1.1.5. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement peut être considéré comme la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton [17].

Le seuil de cisaillement est une fonction linéaire décroissante de l'affaissement



**Figure I.11.** Relation entre affaissement et seuil de cisaillement [6].

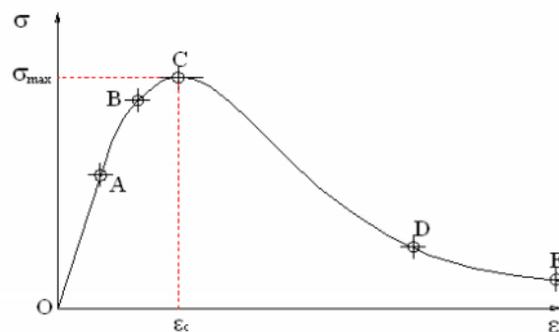
## I.7. Contrôle du comportement du béton durci

### I.7.1. Contrôle destructif

#### I.7.1.1. Comportement du béton en compression

##### a. Compression uni axiale

L'essai de résistance en compression uni axiale sur des éprouvettes de béton normalisées (16x32) est la plus utilisé pour estimer les caractéristiques générales de résistance du béton. les différentes phases de comportement du béton en compression uniaxiale en fonction du niveau de la contrainte appliquée a été étudié par certains auteurs comme Hsu (1963) et Benouniche (1978). La Figure ci-dessous montre les phases de comportement du béton en compression:



**Figure I.12.** – Phases du comportement en compression du béton

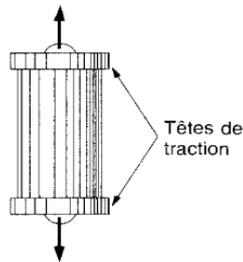
- **Segment (OA)** : Comportement linéaire ou quasi-linéaire jusqu'à ce que  $\sigma = (0.4-0.5)\sigma_{max}$ . Cette phase est caractérisée par les valeurs du module d'élasticité  $E$  et du coefficient de Poisson  $\nu$  du béton. La déformation résiduelle du béton est nulle durant cette phase de chargement.
- **Segment(AB)** : Apparition de microfissures. On considère que cette phase correspond à  $\sigma = (0.5-0.8)\sigma_{max}$ . Le coefficient de Poisson reste constant, tandis que le module d'élasticité diminue légèrement. La déformation résiduelle longitudinale augmente, tandis que la déformation latérale reste nulle. L'endommagement débute par des dégradations diffusées du béton.
- **Segment (BC)** : Développement rapide des microfissures pour  $\sigma = (0.8-1.0)\sigma_{max}$ . Le coefficient de Poisson et les déformations résiduelles augmentent rapidement, alors que l'on constate une forte diminution du module d'élasticité.
- **Segment (CD)**. Apparition et propagation de macrofissures due à la localisation de la déformation. La déformation augmente fortement, tandis que le module d'élasticité diminue jusqu'à s'annuler.
- **Segment (DE)**. Augmentation très rapide de la déformation tandis que la contrainte diminue lentement. La vitesse de propagation des fissures diminue suite à la friction entre les granulats. Cette friction transmet une résistance aux lèvres des fissures et empêche par conséquent la diminution de la contrainte.

## 1.7.1.2. Comportement du béton en traction

La résistance à la traction est mesurée par des essais de traction directe ou indirecte « par des essais de fendage ou de flexion ».

### a. Traction directe

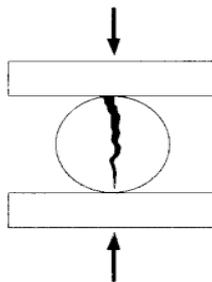
Les essais de traction directe du béton sont difficiles à réaliser vu la faible résistance en traction de ce matériau. Les résultats d'essais réalisés par **Berthaud** (1988), **Terrien** (1980) ou **Gerard** (1996) ont démontré qu'un comportement presque élastique linéaire du béton dans la phase pré-pic peut être considéré, avant une rupture brusque dans la phase post-pic



**Figure 1.13.** -Essai de traction directe-

### **b. Traction par fendage**

La résistance à la traction du béton peut être évaluée par fendage d'éprouvettes cylindriques



**Figure 1.14.** -Essai de traction fendage-

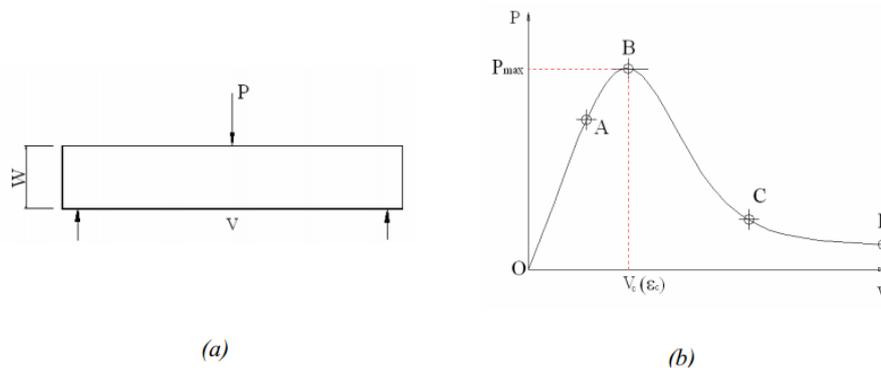
Dans cet essai, la résistance du béton est évaluée à partir de la déformation latérale de l'échantillon (**Picandet** (2001)). Les résultats de **Picandet** (2001) ont montré que la déformation résiduelle latérale d'un cylindre en traction par fendage est approximativement égale à la moitié de la déformation latérale sous chargement.

L'hétérogénéité du champ de contrainte le long du diamètre de rupture et la rupture de traction non typique ont limité l'utilisation des résultats de ces essais dans les calculs d'application.

### **c. Traction par flexion**

Les essais de traction par flexion sont utilisés très couramment au laboratoire, en raison de la simplicité de ces essais et de leur capacité à représenter presque exactement le comportement réel du béton dans des structures de génie civil. Les éprouvettes peuvent être fléchies sur trois ou quatre points. Sur la (Figure 1.15), les résultats d'un essai de traction par

flexion sur 3 points sont présentés sous la forme charge P en fonction de la flèche de l'éprouvette V.



**Figure I.15.** – Essai de traction par flexion 3 points (a) et la relation entre la charge P et la flèche V

Selon (1995), **Bernard** (2000), Le comportement du béton en flexion peut être décomposé en plusieurs phases, :

- **Phase (OA)** : Comportement linéaire tant que quand  $P < (0.7-0.8)P_{max}$ . Présence de microfissures superficielles sur l'éprouvette, mais le module d'élasticité (E) reste constant.
- **Phase (AB)** : Apparition de microfissures à l'intérieur de l'éprouvette, caractérisé par un comportement non linéaire pré-pic. On considère que cette phase s'étend pour  $P = (0.75-1)P_{max}$ . La propagation des microfissures engendre un endommagement diffus du béton. Le module d'élasticité diminue légèrement et des déformations résiduelles apparaissent.
- **(autour du point B)** : Accumulation de microfissures Ces microfissures tendent vers des fissures concentrées. La localisation de la déformation provoquant un endommagement important apparaît.
- **Phase (BC)** : Déformation d'adoucissement, Les zones de localisation de la déformation apparaissent clairement avec plusieurs microfissures concentrées. Le module d'élasticité diminue fortement. Des microfissures sont créées par l'accumulation des microfissures, tandis que les granulats empêchent la propagation des macrofissures.

- **Phase (CD)** Augmentation très rapide de la déformation d'adoucissement, tandis que la charge diminue lentement . La vitesse de propagation des fissures diminue vu la friction existant entre les granulats. Cette friction transmet une résistance entre les lèvres des fissures et empêche par conséquent la diminution de la charge.

## I.7.2. Contrôle non destructif.

En plus des essais cités ci-dessus le béton peut être contrôlé par d'autres essais dits « non destructifs », l'essai au scléromètre [EN 12504-2] (indice de rebondissement) et l'essai aux ultrasons [EN 12504-4] sont les plus utilisés au laboratoire et sur chantier. Ces deux méthodes non destructives ne doivent pas être considérées comme un substitut pour les essais de compression, mais comme un procédé de détermination de l'homogénéité du béton dans les structures [10].

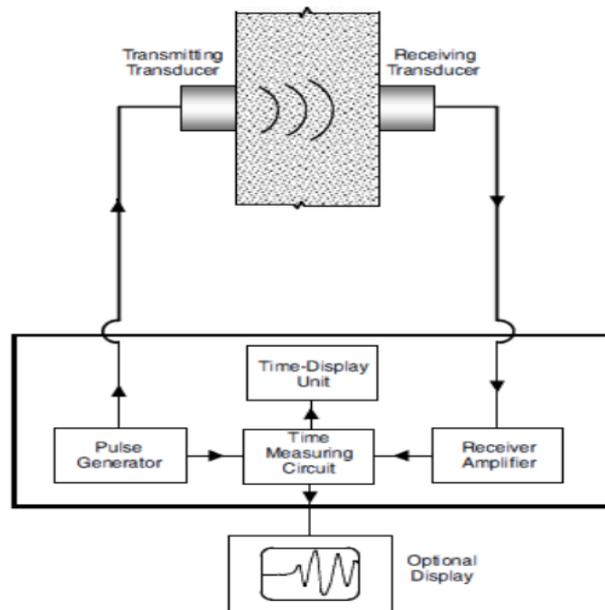
Pour une meilleure fiabilité de ces essais, il est commode de combiner ces techniques pour renforcer l'estimation de la résistance à la compression du béton.

### I.7.2.1. L'essai aux ultrasons

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde qui se propage dans le béton en transmission, Elle consiste à envoyer une onde ultrasonique d'un transducteur “ émetteur” et d'enregistrer le signal réponse par l'intermédiaire d'un transducteur “ récepteur” cette méthode permet principalement de détecter la non uniformité des propriétés de la structure, des grosses fissures ou des vides résultants par des “nids de cailloux”[10]. Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou le coefficient de Poisson des structures.

Selon le chercheur allemand Wesche

- ✓  $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$  béton de faible résistance,
- ✓  $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$  béton de moyenne résistance,
- ✓  $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$  béton à haute résistance,
- ✓  $V \geq 4200 \text{ m/s}$  béton à très haute résistance.



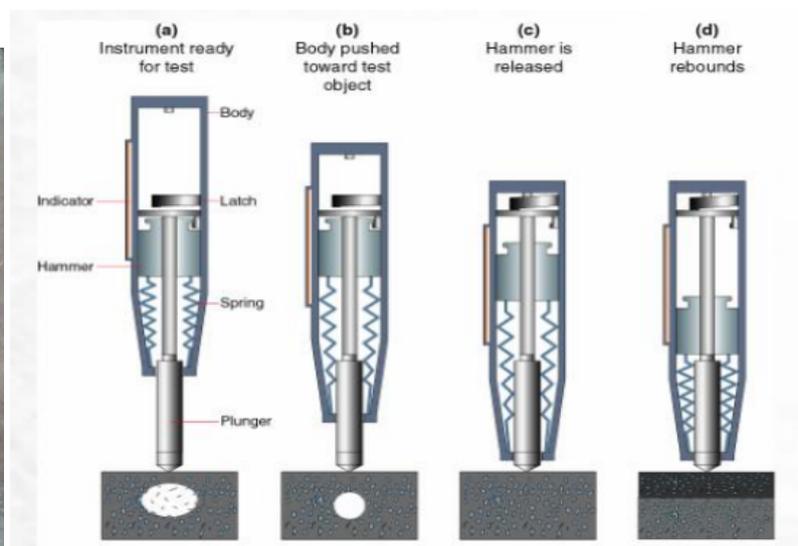
**Figure. I.16** : Schéma du diagramme du circuit de la vitesse de propagation [10].

**I.7.2.2. L'essai au scléromètre**

le scléromètre est la méthode utilisée pour mesurer la dureté superficielle du béton, Le principe du rebondissement consiste à projeter une masselotte par un ressort contre la surface du béton et mesurer ensuite l'indice de rebondissement sur une échelle graduée.



**Figure. I.17.** scléromètre



**Figure. I.18** : principe du fonctionnement du scléromètre

## ***Chapitre II***

# **Revue bibliographique sur la ségrégation du béton**

---

## II. Revue bibliographique sur la ségrégation du béton

### II.1. Avant -propos

Ce chapitre constitue une synthèse bibliographique des travaux réalisés par certains auteurs sur le béton traditionnel et béton fluide (autoplaçant), cette revue concerne les mécanismes de ségrégation du béton, ainsi que les paramètres qui peuvent être à l'origine de cette pathologie.

La ségrégation du béton se définit comme une perte d'homogénéité, elle est due essentiellement à une mauvaise composition, un malaxage insuffisant, ou une vibration excessive de ce matériau[8]. ce phénomène peut être externe ou interne, il se manifeste soit pendant ou après la mise en œuvre, on distingue respectivement la ségrégation dynamique et la ségrégation statique. [3][17].

### II.2. caractérisation de la ségrégation

#### II.2.1. Ségrégation externe

La ségrégation externe est le résultat d'une sollicitation dynamique qui tend les plus gros grains à se séparer de la masse du matériau [2], ce phénomène est, selon Hermite dû au manque de cohésion.



**Figure II.1.** Ségrégation externe du béton

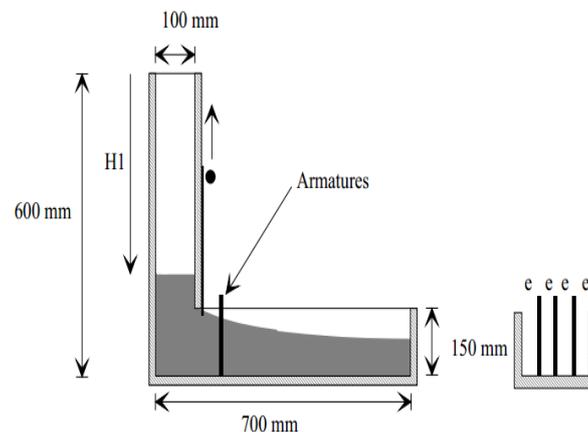
## II.2.2. Ségrégation interne

### II.2.2.1. Ségrégation dynamique

Plusieurs essais ont été développés pour caractériser la ségrégation dynamique du béton, afin de mettre en évidence la capacité du matériau à s'écouler à travers d'un milieu confiné.

#### II.2.2.1.1. Essai à la boîte en L (L-Box)

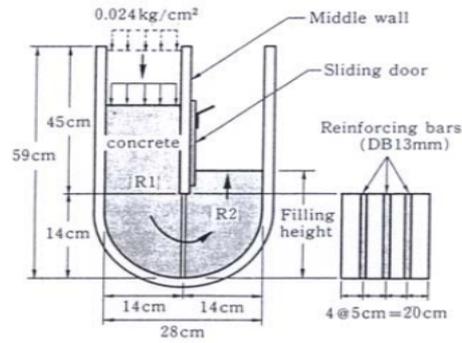
Pour le béton de consistance fluide, cet essai est recommandé par AFGC afin de vérifier la capacité du béton à s'écouler sans création du blocage au niveau des armatures. La hauteur H1 de la partie verticale et H2 de la partie horizontale sont mesurées à la fin de l'essai, le rapport H2/H1 doit être supérieur à 0.8 [3]. un mauvais écoulement du béton et un amoncellement de granulats sont signe d'un blocage ou de ségrégation [3].



**Figure II.2.** Essai à la boîte en L (L-Box)

#### II.2.2.1.2. Essai à la boîte en U (U-Box)

Le principe de cet essai est proche de l'essai à la boîte en L, le béton doit s'écouler à travers les armatures et remonter dans la deuxième partie de U (figure II.3), une hauteur de remplissage de 300 mm est requise.



**Figure II.3.** Essai à la boîte en U (U-Box)

**II.2.2.1.3. Essai de stabilité au tamis**

C'est un essai proposé dans les recommandations provisoires de l'AFGC, il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance d'un échantillon du béton passant à travers un tamis de 5 mm.

Le pourcentage  $\pi$  est calculé par la formule suivante [1].

$$\pi = \frac{P \text{ laitance}}{P \text{ échantillon}} 100$$



**Figure II.4.** Essai au tamis

Selon les recommandations de l'AFGC, un BAP doit présenter une stabilité au tamis inférieure à 15 %. La stabilité est jugée critique quand la stabilité au tamis est comprise entre 15% et 30%.

### Remarque

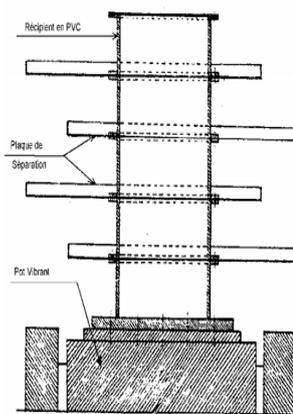
L'absence de ségrégation dynamique lors d'un essai à la boîte en L-Box ou au V-funnel ne suffit pas à garantir l'homogénéité des propriétés finales du matériau. Une instabilité du matériau peut également s'opérer lors de la phase de repos précédant la prise. Cette ségrégation statique est abordée ci-après.

### II.2.2.3.Ségrégation statique

#### II.2.2.2.1.Béton traditionnel

Sidky, Legrand et Barrioulet (1981) [12], montrent que la concentration en granulats et le temps de vibration influent sur la ségrégation interne du béton définie par ( Hermite ) comme étant la propriété que possèdent les classes des grains les plus gros de se déplacer au sein du béton, suivant la direction de la pesanteur, ces auteurs ont développé un essai pour les bétons ordinaires qui consiste à remplir un récipient de 425 mm de haut et de 187 mm de diamètre intérieur de béton. Le récipient est ensuite vibré. Le béton est séparé en cinq couches égales à l'aide de séparateurs incorporés dans le récipient. Chaque couche est analysée (masse de la pâte et masse des granulats) afin de déterminer un coefficient de ségrégation 'Si' qui indique la richesse en granulats. Le coefficient de ségrégation est la concentration en granulats d'une couche de béton sur la concentration initiale. Ainsi,

- $Si > 1$  indique un enrichissement en granulats et
- $Si < 1$ , un appauvrissement en granulats.



**Figure II.5.** : Dispositif Expérimental utilisé par (Sidky, Legrand et Barrioulet).

**II.2.2.2.Méthode de comptage**

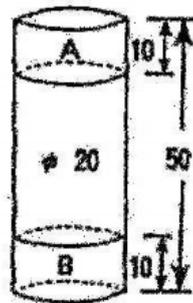
Cette méthode consiste à déterminer le coefficient de la résistance à la ségrégation [8] , Plusieurs techniques sont utilisées dans la littérature et qui se basent sur le même principe de la méthode de Sidky.

Le coefficient de la résistance à la ségrégation du béton est calculé à l'aide de la formule suivante [8] :

$$f = A/B$$

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

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



**Figure II.6.** Cylindre d'échantillonnage et détermination de la résistance à la ségrégation « f ».

Un béton ayant une bonne résistance à la ségrégation présente un coefficient de résistance à la ségrégation  $f$  supérieur à 95 % [8].

De même principe (S. BENSEBTI et al) ont défini un indice de ségrégation statique « ISS » d'un BAP donné par la formule suivante

$$ISS = (G_{inf} - G_{sup}) 100.$$

Avec :  $G_{inf}$  : Teneur en gros granulats dans la partie inférieure,

$G_{sup}$  : Teneur en gros granulats dans la partie supérieure.



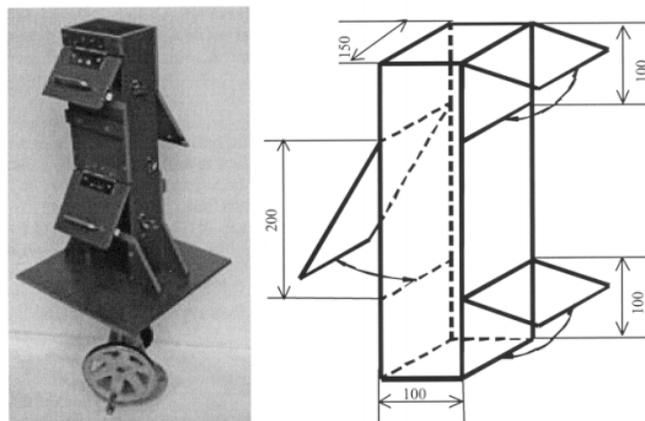
**Figure II.7:** différentes étapes de l'essai de mesure de l'indice de ségrégation statique [16].

D'après les mêmes auteurs, pour obtenir un bon BAP, il est indispensable d'avoir un ISS inférieur ou égal à 5.

### **II.2.2.2.3. Essai à la colonne (béton vibré)**

Cet essai est proche de principe de l'essai précédent, il a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley (en 2002) et par l'Université de Ghent (en 2001). Cet essai consiste à remplir une colonne « voir figure II.8 », 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.



**Figure II.8.** Essai de stabilité à la colonne

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 :

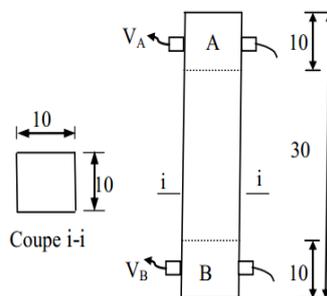
- soit R le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur
- $R > 0,95$  le béton a une bonne résistance à la ségrégation
- si  $R < 0,9$  il y a un risque de ségrégation du béton.

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation verticale (gradation de la ségrégation) [3].

**II.3. méthode non destructive**

**II.3.1.Essai aux ultrasons.**

Cette méthode non destructive a été proposée par (GRINI Abdelouaheb, BENOUIS Abdelhalim) [8], pour investiguer la ségrégation du béton. Les vitesses des ultrasons ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques 10x10x50 cm pour déterminer un rapport des vitesses à travers la partie supérieure sur celle de la partie inférieure.



**Figure II.9.** Détermination de la résistance à la ségrégation par les ultrasons « fu » [8]

L'indice de résistance à la ségrégation par les ultrasons proposé sera donc :

$$f_u = f_{uA} / f_{uB}$$

$$f_{uA} = V_{PA} - V_{VA}$$

$$f_{uB} = V_{PB} - V_{VB}$$

$V_p (A,B)$ : 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

Pour un indice ultrasonique dépassant 98 %, le béton ne présente pas un risque de ségrégation [8].

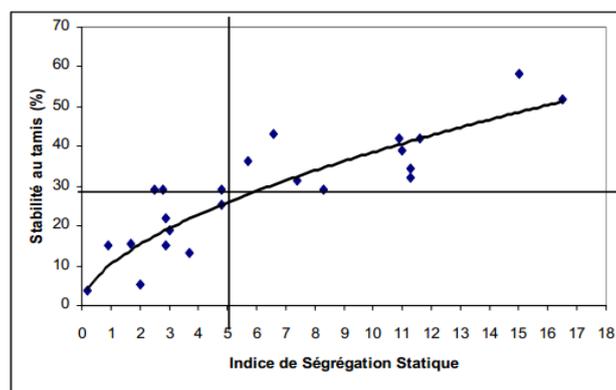
### **II.3.2.Corrélation entre les différentes techniques de caractérisation de la ségrégation**

Pour mieux caractériser la ségrégation du béton, la corrélation entre les différents indices de ségrégation est proposée.

#### **II.3.2.1.Relation entre l'indice de ségrégation statique et la stabilité au tamis**

Les résultats obtenus par (S. BENSEBTI et al) montrent que tous les bétons situés dans le rectangle (voir figure) délimité par une stabilité au tamis de 30% et un indice de ségrégation ISS de 5 sont des bétons de bonne qualité.

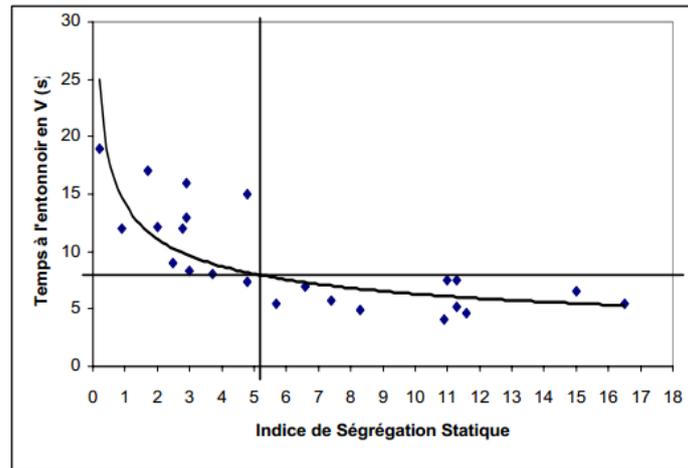
-La limitation à 15% de la Stabilité au tamis est trop sévère et elle peut être augmentée à 20% sans grand risque.



**Figure II.10:** Relation entre la stabilité au tamis et l'indice de ségrégation [16].

#### **II.3.2.2.Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'indice de ségrégation**

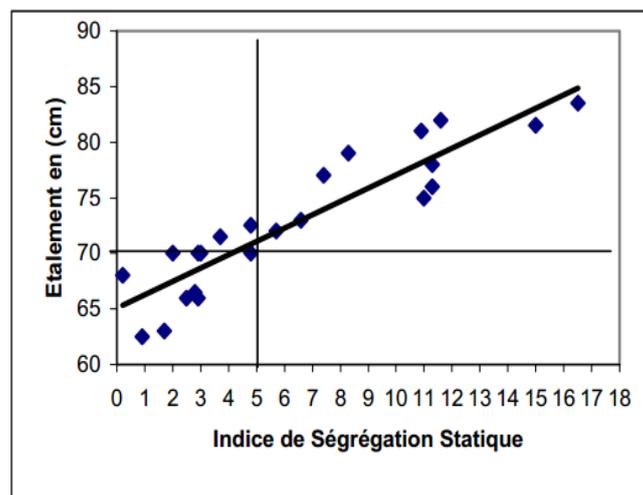
Les essais effectués par [17] montre que pour un temps d'écoulement inférieur à 8 s le risque de ségrégation statique est important tandis que ce risque est minimisé pour un temps d'écoulement supérieur à 10 s



**Figure II.11** : Relation entre le temps d'écoulement et l'indice de ségrégation [16].

**II.3.2.3. Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation**

La figure montre que le risque de la ségrégation commence à devenir important quand l'étalement au cône d'Abrams dépasse 70 cm [15].



**Figure II.12**: Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation

## ***Chapitre III***

# ***Matériaux utilisés et méthodologie d'essais***

---

**III. Matériaux utilisés et méthodologie d'essais**

**III.1 .Introduction**

Ce chapitre s'intéresse à présenter les caractéristiques des différents matériaux utilisés, les formulations et les procédures de malaxage pour confectionner nos bétons ainsi que les différents essais expérimentaux exécutés pour les caractériser à l'état frais et à l'état durci.

**III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés**

Dans tous les mélanges de notre étude, nous avons utilisé les matériaux présentant les caractéristiques suivantes :

**a)Le ciment**

Dans les mélanges on a utilisé le ciment CPJ CEMII/A 42.5 N de la cimenterie SOUR EL GHOUZLANE



**Figure-III.1-** marquage sur le sac du ciment

Ses analyses physiques, mécaniques, minéralogiques et chimiques communiquées par le producteur sont représentées respectivement dans les tableaux suivant :

Consistance normale (%)	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Expansion (mm)
25.5	4015	120	305	1.5

**Tableau III.1.** Caractéristiques physiques du ciment employé.

Résistance à la flexion (MPa)			Résistance à la ompression (MPa)		
2j	7j	28j	2j	7j	28j
4.19	5.58	6.15	21.80	34.20	43.65

**Tableau III.2.** Propriétés mécaniques du ciment S.E.G.

Composants minéralogiques	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Teneurs (%)	50.82	19.48	8.33	8.45

**Tableau III.3.** Analyse minéralogique du ciment employé

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO <sub>l</sub>
Teneurs (%)	22.84	4.92	2.78	57.83	5.33	2.53	0.31	0.92	1.30

**Tableau III.4.** Analyse chimique de ciment employé

### **b) Les granulats**

Dans tous les mélanges de notre étude, nous avons utilisé les matériaux granulaires suivants :

- Sable roulé de la sablière de BOUSSAADA
- Gravier 8/15 carrière EL MHIR
- Gravier 15/25 carrière EL MHIR

Dans le but de déterminer les caractéristiques et les propriétés des granulats utilisés

une série d'essais a été exécuté, il s'agit de ;

- Analyse granulométrique norme NF P18-304
- Equivalent de sable norme NF P18-598
- Masse volumique absolue norme NF P18-558
- Module de finesse

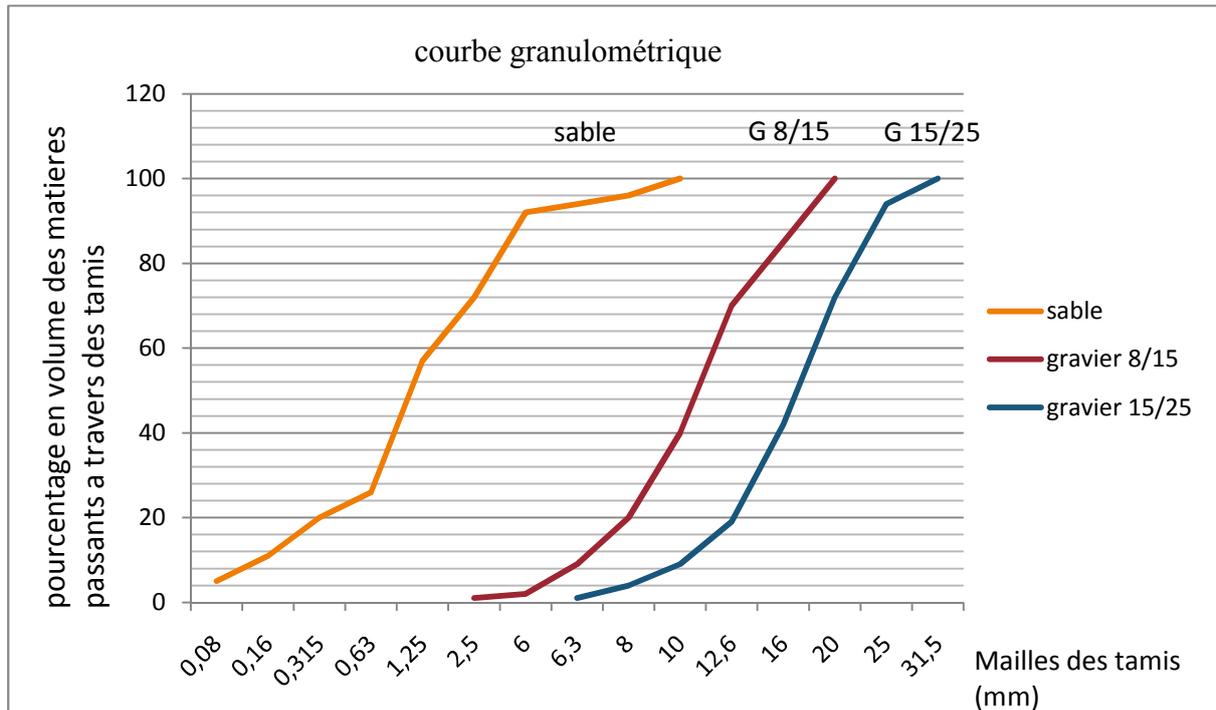
### **III.3. Analyse granulométrique**

L'analyse s'effectue par tamisage avec un jeu normalisé de tamis. On superpose les tamis par dimensions croissantes, et l'on place un récipient sans ouverture sous la pile. Après tamisage, on mesure les refus de chaque tamis ainsi que le tamisât ayant passé à travers le tamis le plus fin. La courbe granulométrique indique les proportions des grains de chaque dimension.

MODULE	DIMENSION TAMIS (mm)	% TAMISAT SABLE	% TAMISAT GRAVIER 8/15	%TAMISAT GRAVIER 15/25
46	31.5			100.00
45	25			94.36
44	20			72.69
43	16		100.00	42.40
42	12.5		85.19	19.73
41	10	100.00	69.45	9.07
40	8	96.03	40.28	4.03
39	6.3	94.20	20.36	0.38
38	5	92.30	9.73	
35	2.5	72.07	1.05	
32	1.25	57.94	0.38	
29	0.63	26.30		
26	0.315	20.40		
23	0.16	11.36		
20	0.08	5.20		

**Tableau III.5.** Résultats d'analyse granulométrique.

Les courbes granulométriques établies à partir des résultats de l'analyse granulométrique sont comme suit :



**Figure. III.2.** Courbes granulométriques.

**III.4. Propriétés des granulats**

**III.4.1. Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente est la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides, elle est donnée par la formule suivante :  $a = M_t / V_t$

M<sub>t</sub> : masse totale d'échantillon.

V<sub>t</sub> : volume total d'échantillon.

**III.4.2. La masse volumique absolue :**

C'est la masse par unité de volume de la matière solide qui constitue le matériau sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains, elle est donnée par la formule suivante :

$$M_{ab} = M_t / V_a$$

M<sub>t</sub> : masse totale d'échantillon.

V<sub>a</sub> : volume absolu d'échantillon.

### III.4.3. Module de finesse :

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse M f. celui - ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis d'ouverture : 0.16 -0.315-0.63 -1.25 -2.5 et 5 (mm) sur 100, Calculé par la relation suivante :

$$Mf = \sum Rc/100$$

### III.5. Propreté des granulats :

#### III.5.1.Équivalent de sable :

Cet essai est défini par la norme NF P18 -598, il est utilisé pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton, Il consiste à laver un poids défini de sable dans une solution lavante. Après agitation, on laisse le mélange se décanter pendant 20 minute, on en déduit l'équivalent de sable qui est donné par:

$$Es = (h1/h2) * 100 \%$$

h 1 : hauteur des grains solides sableux.

h 2 : hauteur des grains solides sableux+ impuretés.

ES : l'équivalent de sable. Selon la hauteur h2 mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

ESV (équivalent de sable visuel) ;

ESP (équivalent de sable au piston).



**Figure III.3.** Équivalent de sable

A l'issus des différents essais réalisés, les granulats utilisés ont présenté les propriétés suivantes :

Classification	sable	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Masse volumique absolue	2.814	2.643	2.637
Masse volumique apparente	1.835	1.343	1.336
Propreté superficielle	-----	0.39	0.35
Equivalent de sable	75.20	-----	-----
Module de finesse	3.19	-----	-----

**Tableau III.6.** Propriétés des granulats

**c)Eau de gâchage :** Il s'agit de l'eau potable « du robinet », nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008).

**III.6. Méthodologie expérimentale**

La méthode de formulation des bétons est celle de **FAURY**. En prenant un dosage en ciment constant de 350 kg pour 1m<sup>3</sup> de béton.

**III.6.1. Formulation du béton selon la méthode de FAURY**

$$Y_c = A + 17 (D_{max})^{1/5}$$

$$D_{max} = d_1 + (d_1 - d_2) X/Y$$

d1 est la dimension de 1<sup>er</sup> tamis refus en mm = 20

d2 est la dimension du tamis immédiatement inférieur d1 en mm = 16

A=30.00      K= 0.370

X est le refus en % du tamis D1 = 21.67

Y = tamisât de D1- tamisât de D2 = 21.67

Donc DC = 20+ (20-16) X/Y = 24.00

DC/2 = 12.00 mm

Yc = 62.10 %

Dosage en ciment kg/m <sup>3</sup>	350 kg/m <sup>3</sup>
Volume absolu du ciment en L	=112.90 L
Eau de gâchage	= 196 L
Volume absolu des matières sèches = 1000-I	= 804
Pourcentage du ciment	=14.04 %

**III.6.1.1. Détermination de la composition du béton**

La composition d'1 m<sup>3</sup> du béton est définie comme suit :

composants	%	MV.ABS Kg/m <sup>3</sup>	Composition Kg/m <sup>3</sup>	Composition l/m <sup>3</sup>
Sable roulé	31.96	2.814	723	434
Gravier 8/15	28.00	2.643	595	443
Gravier 15/25	26.00	2.637	551	410
ciment	14.04	3.100	350	299
Total m/sèche	100.00		2219	1586
Eau (l)	196		196	196
total			2415	1782

**Tableau III.7.** Composition de 1 m<sup>3</sup> de béton

$E/C = 0.56, \quad G/S = 1.59, \quad C/E = 1.79$

**III.6.2. Confection des éprouvettes :**

Dans le cadre de notre étude expérimentale et afin de pouvoir caractériser la ségrégation du béton, trois (03) séries des éprouvettes ont été confectionnées.

**a) première série d'éprouvettes :**

Cette série comporte des éprouvettes cylindriques normalisées (16x32) témoins avec un rapport  $E/C = 0.56$ , ces éprouvettes ont été soumises à une vibration externe à l'aide d'une table vibrante, l'arrêt de l'apparition des bulles d'air marque le temps normale de vibration, ce temps sert comme référence pour les deux autres séries.

Pour cette série deux(02) éprouvettes ont été soumises à une vibration avec enregistrement des temps de vibration suivants : 11s et 14 s, le temps référentiel égal à la moyenne 13s.

#### **b) deuxième série d'éprouvettes:**

Cette série comporte 10 éprouvettes cylindriques (16x32) confectionnées avec un rapport  $E/C = 0.56$  (affaissement = 8 cm).pour cette série on fait varier le paramètre temps de vibration (20s, 25s, 30s, 35s, 45s).

#### **c) troisième série d'éprouvettes :**

Dans cette série, on fait varier le rapport E/C (0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8) de consistances (12 ; 15,5 ; 19 ; 22 ; 26) cm, et on fixe le temps de vibration à 13s. Nombre d'éprouvettes égale à 10.

#### **III.6.3. Conservation et stockage des éprouvettes**

Le démoulage est effectué après 24 heures. Ensuite, les éprouvettes sont stockées à l'air libre (au niveau de laboratoire).



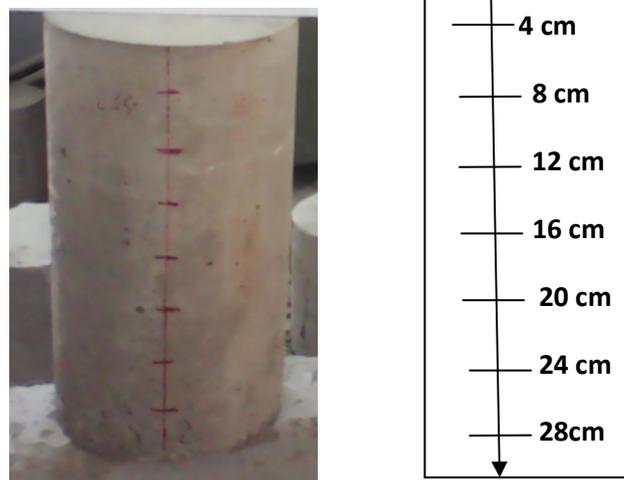
**Figure.III.4.** éprouvettes à tester.

#### **III.7. Essais réalisés :**

Après 28 jours durée nécessaire pour le durcissement des bétons, nous avons procédé aux essais non destructif (essai sclérométrique et ultrasonique) ainsi que les essais destructifs « Essai de résistance à la compression ».

**III.7.1. Essai au scléromètre**

Pour réaliser cet essai nous avons devisé la hauteur des éprouvettes pour indiquer les points d'application de l'appareil (4 cm entre chaque point), l'éprouvette est fixée par la machine de compression pour éviter tout mouvement.



**Figure III.5.** : Points de mesure sur éprouvettes

L'appareil est appliqué perpendiculairement sur l'éprouvette ( $\alpha = 0$ ), l'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée de l'appareil scléromètre. Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux ci-dessous.



**Figure III.6.** : Essai au scléromètre

### III.7.2.Essai aux ultrasons

#### III.7.2.1.Mesures directes (en transparence)

Les transducteurs (émetteur et récepteur) sont appliqués sur les deux faces opposées de l'éprouvette à tester (dans le sens de l'application de la charge). Ce sont les mesures les plus utilisées (réception du maximum d'énergie). Pour un meilleur contact entre le béton et les transducteurs nous avons employé un matériau qui est la graisse (notons qu'il y a un gel spéciale pour cet effet). Pour les surfaces rugueuses, nous avons procédé au ponçage avec une pierre ponceuse.

La vitesse d'impulsion est donnée par la formule :

$$V=d/T$$

où :

V est la vitesse de propagation de l'onde sonique.

d est la longueur de parcours (hauteur de l'éprouvette).

T est le temps que met l'onde pour parcourir la longueur.



**Figure III.7** : essai aux ultrasons

#### III.7.3.Essai de résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ( $R_c$ ) par écrasement ont été effectués sur les éprouvettes conformément à la norme NFP 18-406. La résistance à la compression est calculée à partir de la moyenne de deux essais réalisés sur des éprouvettes identiques. L'écrasement des éprouvettes est fait sur une presse hydraulique de force 1500 KN (Figure III. 8 ).



**Figure III.8** : Machine de compression.

***Chapitre IV***

***Présentations, Analyse  
et Discussion des résultats***

**IV. présentations, analyse et discussion des résultats****IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus expérimentalement sur béton durci, précédemment exposés au chapitre 03, dans le cadre de l'étude de comportement mécanique d'un béton ségrégué. Pour notre travail on s'est intéressé à :

- l'influence de la valeur du rapport E/C (cas d'un béton vibré) sur les caractéristiques mécanique tel que la résistance à la compression, le module d'élasticité et la masse volumique.
- l'influence du temps de vibration sur la résistance à la compression du béton, le module d'élasticité et la masse volumique.

**IV.2. Présentation des résultats****IV.2.1. Résultats des essais au scléromètre****IV.2.1.1. Première série d'éprouvettes:**

Pour les éprouvettes témoins nous avons obtenu les résultats suivants (28 jours)

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement (R)
01	0,56	11	32
			33
			32
			33
			33
			34
			33
02	0,56	14	32
			33
			33
			34
			34
			33
			34

**Tableau IV.1.** Indice R = f (t ; E/C =0.56)

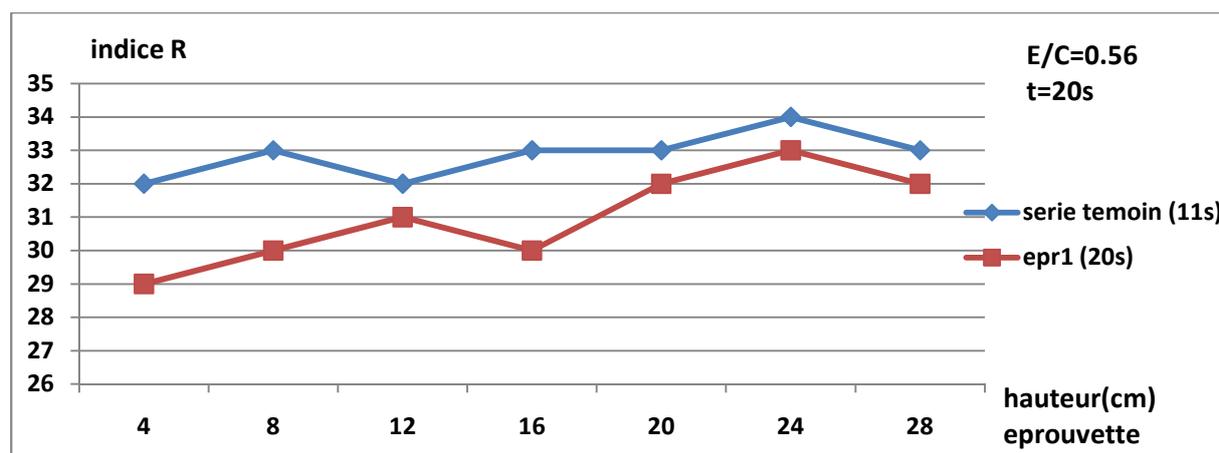
**IV.2.1.2.deuxième série d'éprouvettes**

Pour les éprouvettes de cette série nous avons obtenu les résultats suivants (à 28 jours)

1) pour  $t= 20s$  et  $E/C=0.56$ , les résultats de l'essai sont comme suit :

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement (R)
01	0,56	20	29
			30
			31
			30
			32
			33
			32
02	0,56	20	29
			30
			30
			31
			33
			32
			33

**Tableau IV.2.** Indice R pour  $t= 20s$  et  $E/C=0.56$



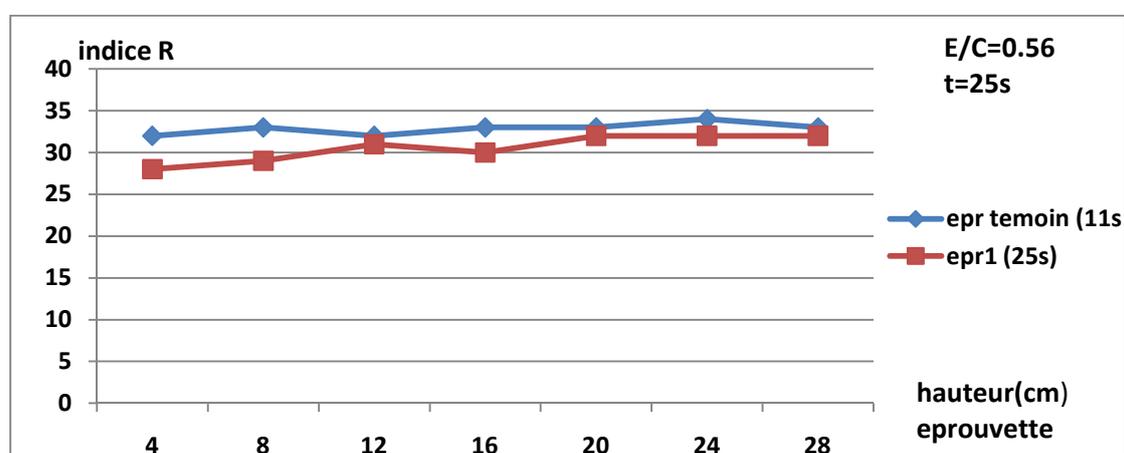
**Figure. IV .1.** Indice R pour  $t= 20s$  et  $E/C=0.56$

**Commentaire.** La figure montre une faible variation dans les valeurs de l'indice R pour un temps de vibration de  $t=20 s$  comparativement à l'éprouvette témoin, d'ailleurs on constate le rapprochement des indices dans les parties inférieures.

- 2) pour  $t=25s$  et  $E/C=0.56$ , les résultats de l'essai sont comme suit :

épreuves	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,56	25	28
			29
			31
			30
			32
			32
			32
02	0,56	25	29
			30
			30
			31
			33
			32
			32

**Tableau IV.3.** Indice R pour  $t=25s$  et  $E/C=0.56$



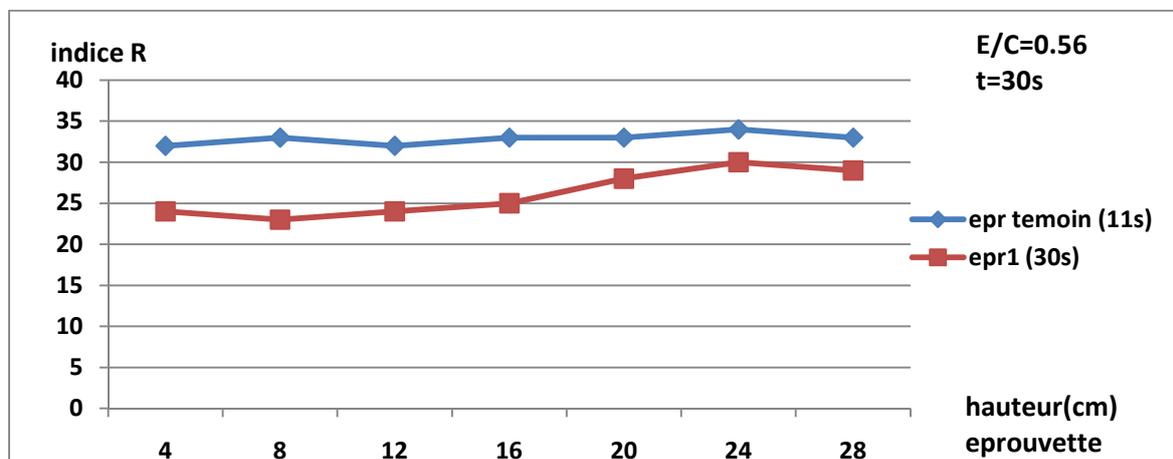
**Figure IV.2.** Indice R pour  $t=25s$  et  $E/C=0.56$

- **Commentaire.** Cette figure explicite une faible variation dans les valeurs de l'indice R pour l'éprouvette ayant subi un temps de vibration de  $t=25s$  comparativement à l'éprouvette témoin, d'ailleurs on constate le rapprochement des indices dans les  $\frac{3}{4}$  inférieurs de leur hauteur.

3) pour  $t= 30s$  et  $E/C=0.56$ , les résultats de l'essai sont comme suit :

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement (R)
01	0,56	30	24
			23
			24
			25
			28
			30
			29
02	0,56	30	25
			25
			27
			28
			30
			30

**Tableau IV.4.** Indice R pour  $t= 30s$  et  $E/C=0.56$



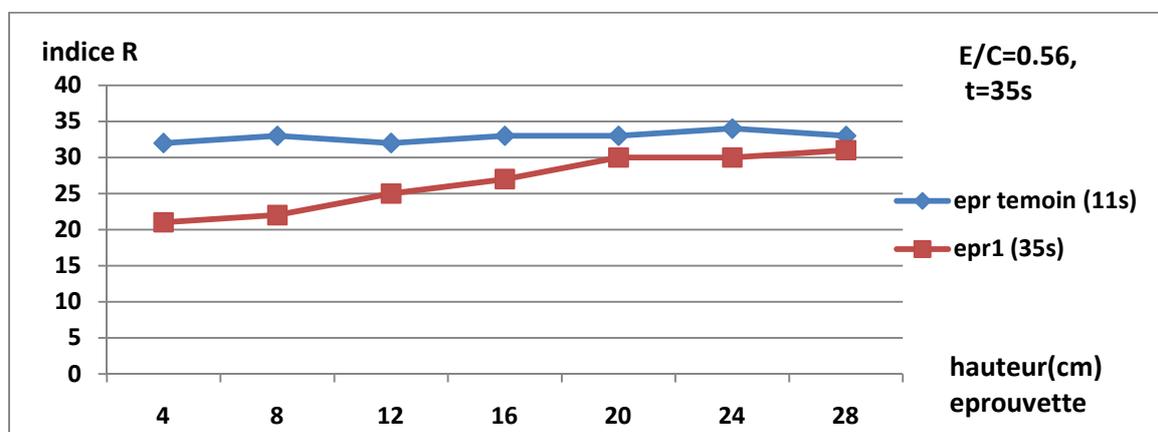
**Figure IV.3.** Indice R pour  $t= 30s$  et  $E/C=0.56$

- **Commentaire.** Pour une augmentation légère de temps de vibration  $t=30s$ . L'indice R présente une réduction supplémentaire toujours dans la partie supérieure de l'éprouvette et il s'approche de ceux de l'éprouvette témoin dans les 1/3 inférieurs.

4) pour  $t= 35s$  et  $E/C=0.56$ , les résultats de l'essai sont comme suit :

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,56	35	21
			22
			25
			27
			30
			30
			31
02	0,56	35	20
			23
			25
			28
			30
			30
			30

**Tableau IV.5.** Indice R pour  $t= 35s$  et  $E/C=0.56$



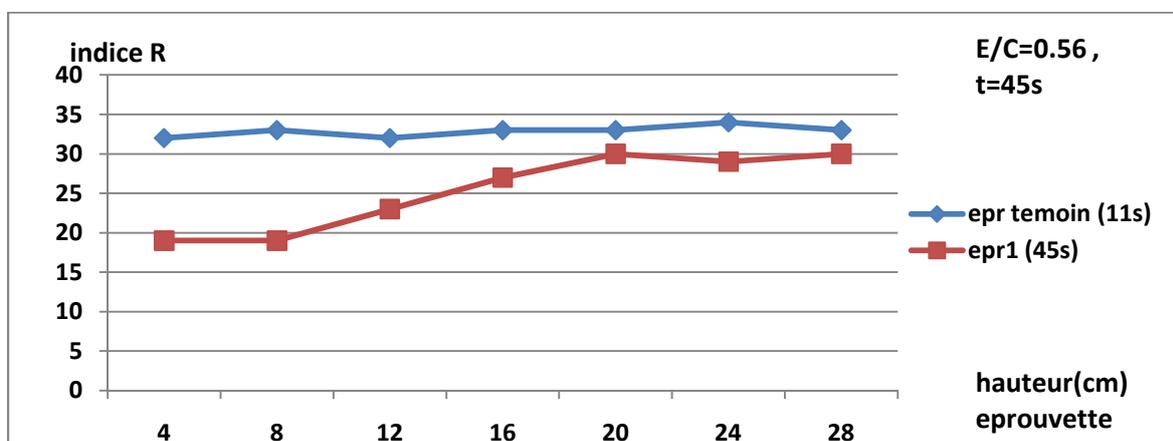
**Figure IV.4.** Indice R pour  $t= 35s$  et  $E/C=0.56$

- Commentaire:** Pour un rapport E/C égal et temps de vibration différents, on peut constaté que l'augmentation de temps de vibration a engendré une diminution de l'indice de rebondissement R dans la partie supérieure des éprouvettes de la 2eme série d'éprouvettes; tout en se maintiendra proche de ceux des éprouvettes témoins dans les derniers 10 cm de l'éprouvette "partie inferieure".

5) pour  $t= 45s$  et  $E/C=0.56$ , les résultats de l'essai sont comme suit :

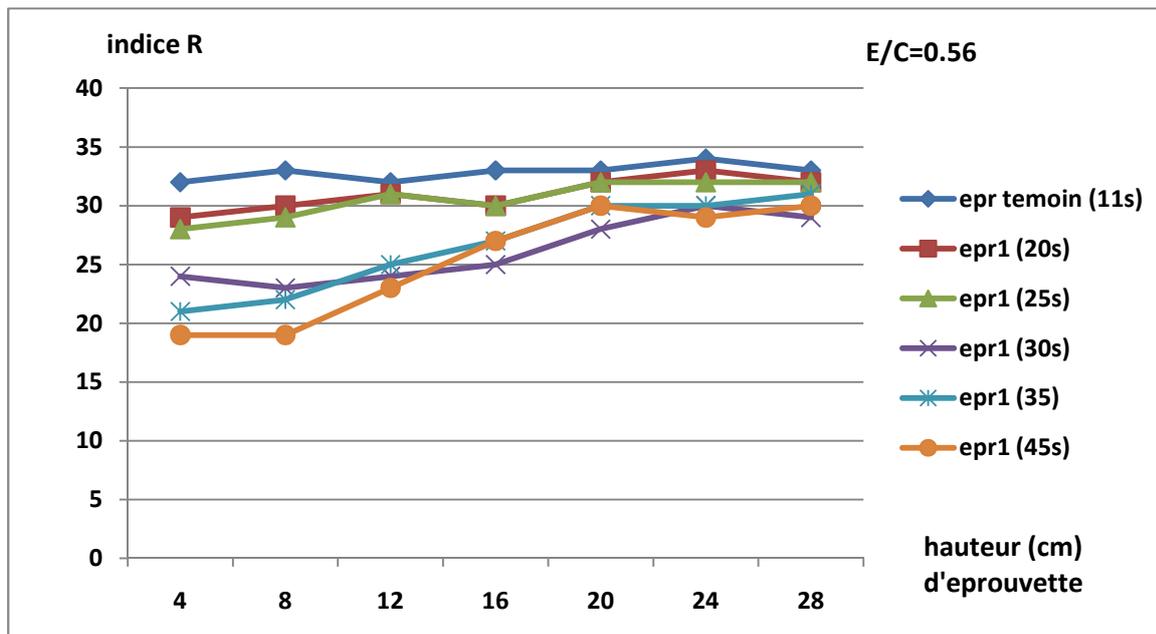
épreuves	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,56	45	19
			19
			23
			27
			30
			29
			30
02	0,56	45	18
			19
			22
			26
			28
			30
			30

**Tableau IV.6.** Indice R pour  $t= 45s$  et  $E/C=0.56$



**Figure IV.5.** Indice R pour  $t= 45s$  et  $E/C=0.56$

- Commentaire.** La courbe illustré ci-dessus montre que plus on augmente dans la durée de vibration la diminution des valeurs des indices R devient considérable dans la moitié supérieure de l'éprouvette. Dans la partie inférieure les valeurs restent rapprochées de celles de l'éprouvette témoin.



**Figure IV.6.** Indice R= f( t ; E/C=0.56)

- **Commentaire.** Pour cette courbe récapitulative, on peut constater qu'une vibration excessive provoque une diminution de l'indice R.

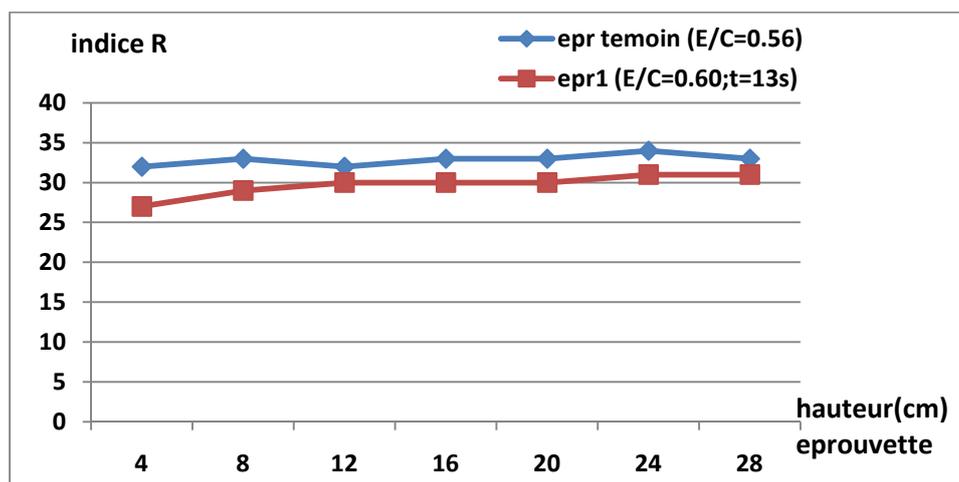
La zone la plus affectée par la chute des caractéristiques mécaniques est bien la partie supérieure de l'éprouvette

**IV.2.1.3. La troisième série**

1) pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.60$

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,6	13	27
			28
			30
			30
			31
			31
			31
02	0,6	13	27
			29
			30
			30
			30
			31
			31

**Tableau .IV.7.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.60$ .



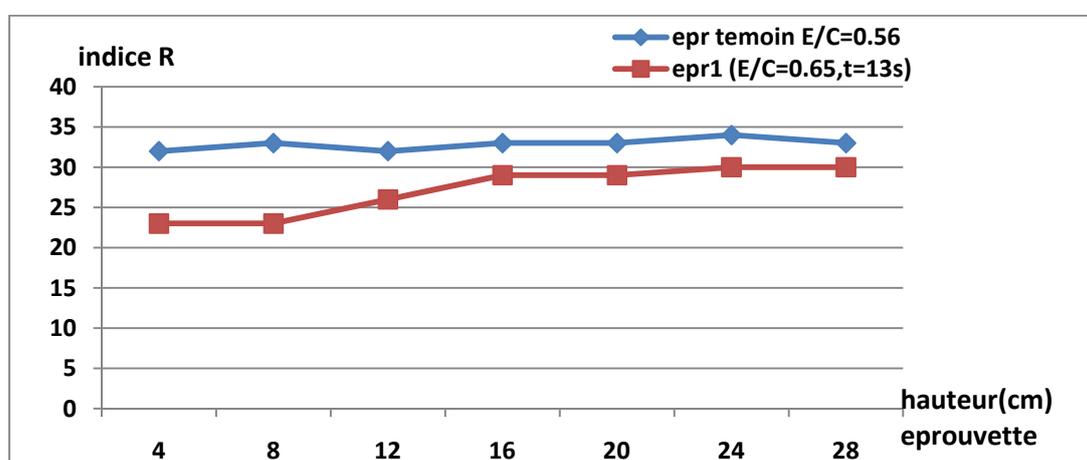
**Figure IV.7.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.60$

- **Commentaire.** Pour une augmentation de  $E/C=0,60$ . L'indice R présente une réduction dans la partie supérieure de l'éprouvette et il s'approche de ceux de l'éprouvette témoin dans les 2/3 inférieurs

- 2) pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.65$

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,65	13	23
			23
			26
			29
			29
			30
			30
02	0,65	13	22
			23
			25
			29
			29
			30
			30

**Tableau IV.8.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.65$



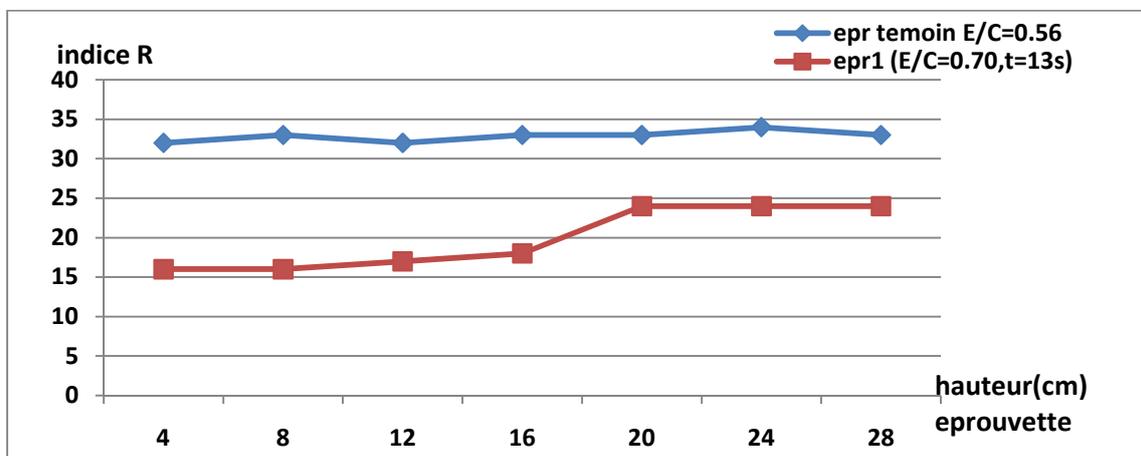
**Figure IV.8.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.65$

- **Commentaire.** La courbe ci-dessus montre qu'en augmentant le rapport E/C, les valeurs de l'indices R diminuent sensiblement dans la moitié supérieure et une légère diminution dans la moitié inférieure de l'éprouvette par rapport à l'éprouvette témoin.

3) pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.70$

éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement (R)
01	0,7	13	16
			16
			17
			18
			24
			24
			24
02	0,7	13	16
			16
			18
			23
			24
			23
			24

**Tableau .IV.9.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.70$



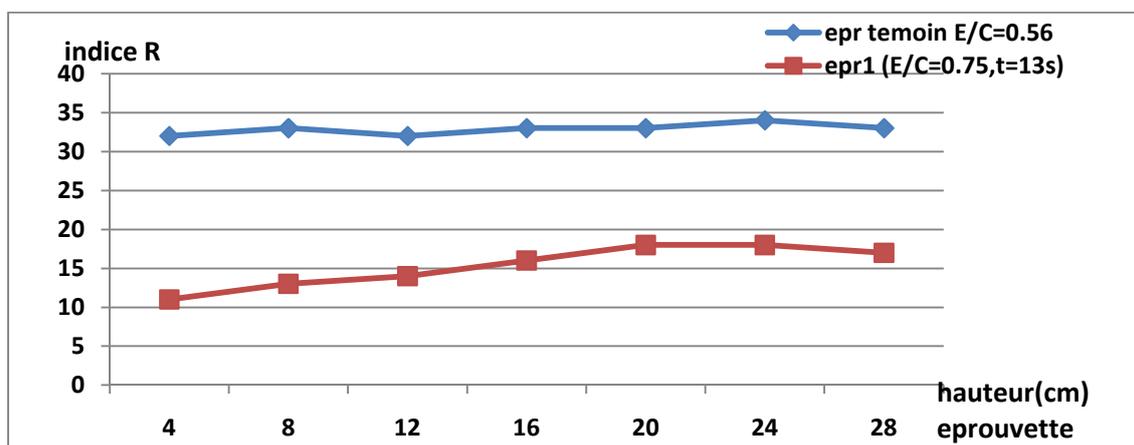
**Figure IV.9.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.70$

- **Commentaire.** Une chute remarquable des valeurs de l'indice R sur la partie supérieure et une diminution de l'indice R sur toute la hauteur de l'éprouvette pour un rapport  $E/C=0.70$  par rapport l'éprouvette témoin.

4) pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.75$

épreuves	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,75	13	11
			13
			14
			16
			18
			18
			17
02	0,75	13	12
			13
			15
			15
			19
			18
			18

**Tableau .IV.10.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.75$ .



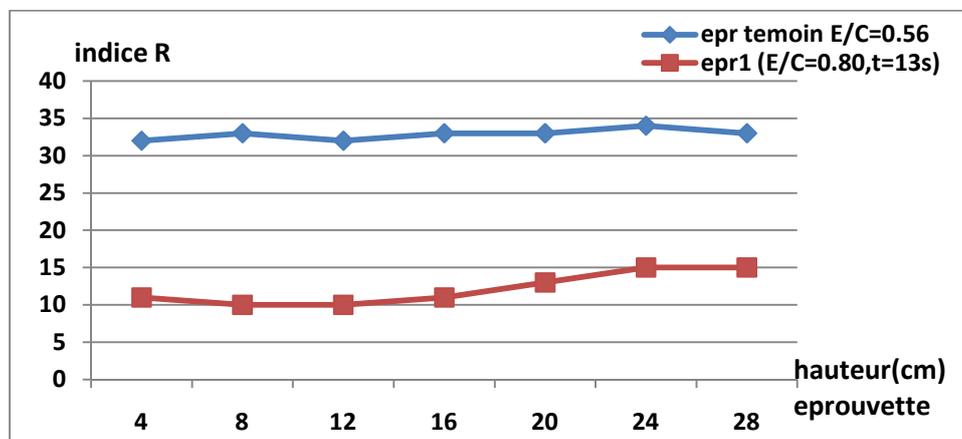
**Figure IV.10.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.75$

- **Commentaire.** La figure ci-dessus montre que les valeurs de l'indice R continuent à diminuer en augmentant le rapport E/C, ce qui explique que ce rapport a une influence importante sur les caractéristiques du béton.

5) pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.80$

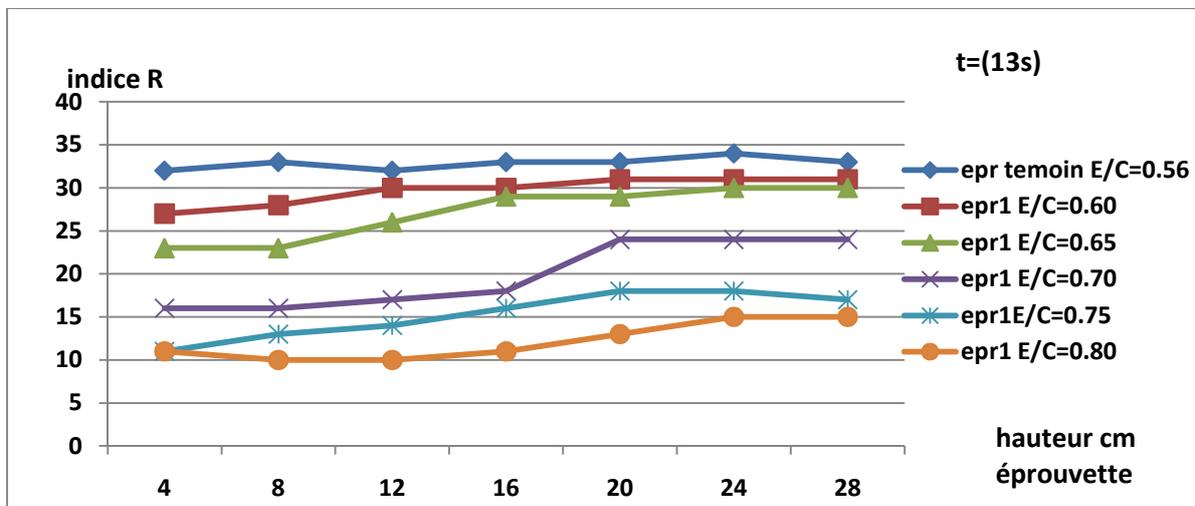
épreuves	E/C	temps de vibration (s)	indice de rebondissement ( R )
01	0,8	13	11
			10
			10
			11
			13
			15
			15
			10
02	0,8	13	11
			11
			12
			12
			13
			13
			13

**Tableau 4.11.** Indice R pour  $t= 13s$  et  $E/C=0.80$



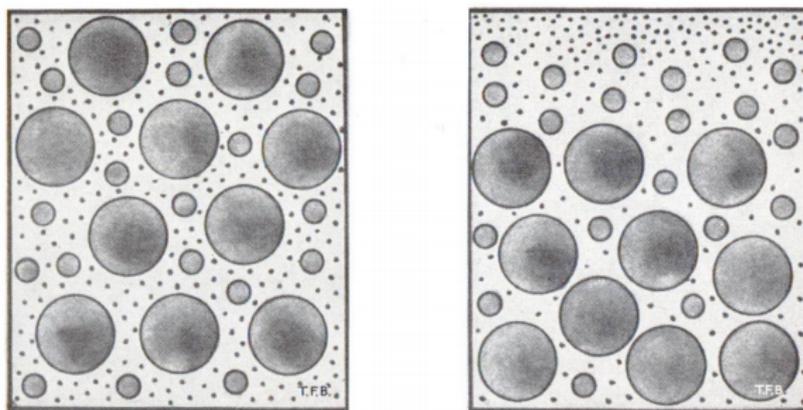
**Figure IV.11.** Indice R  $t= 13s$  et  $E/C=0.80$

- **Commentaire.** Pour un rapport E/C élevé et un temps de vibration normale, on remarque une importante diminution des valeurs de l'indice R sur toute la hauteur de l'éprouvette.



**Figure IV.12.** Indice R = f( t= 13s et E/C)

- **Commentaire.** Pour cette courbe récapitulative, on constate que pour une augmentation de rapport E/C, l'indice R diminue jusqu'à atteindre les valeurs les plus bas pour un rapport E/C élevé..



**Figure. IV. 13** Représentation schématique de la ségrégation par sédimentation.

**IV.2.2.Résultats d'essai aux ultrasons**

**IV.2.2.1.Première série d'éprouvettes (témoins)**

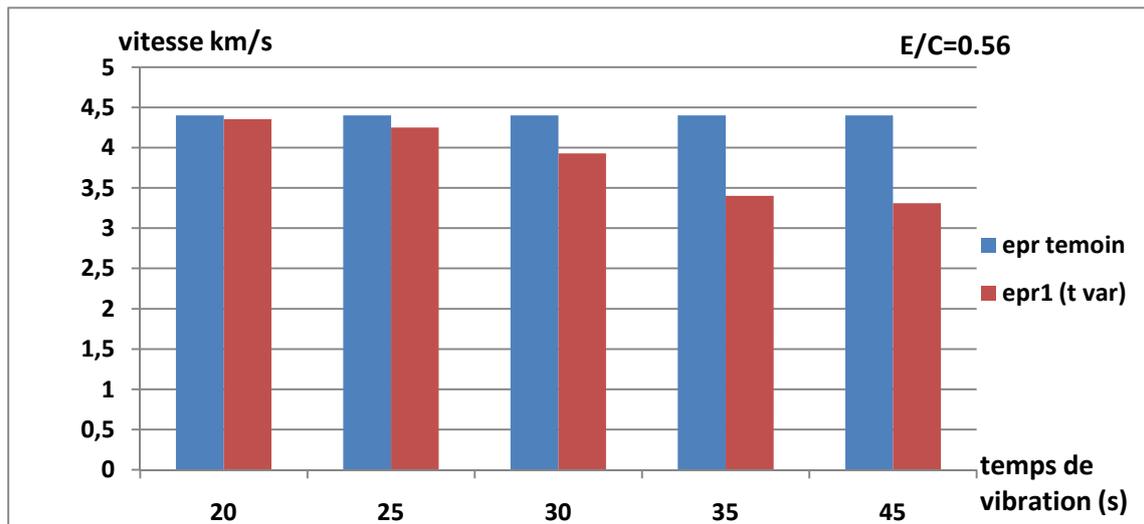
éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	distance (cm)	temps (μs)	vitesse (km/s)
01	0,56	11	32	71	4.4
02	0,56	14	32	74	4.5

**Tableau IV.12.** vitesse de son  $V = f(t; E/C = 0.56)$ .

**IV.2.2.2.Deuxième série d'éprouvettes**

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	distance (m)	temps parcouru (μs)	vitesse (km/s)
Epr1	0,56	20	0,32	73	4.35
Epr2		20		72	4.40
Epr1	0,56	25		75	4.25
Epr2		25		76	4.18
Epr1	0,56	30		81	3.93
Epr2		30		82	3.90
Epr1	0,56	35		94	3.40
Epr2		35		93	3.42
Epr1	0,56	45		96	3.31
Epr2		45		100	3.20

**Tableau IV.13.** vitesse de son  $V = f(t; E/C = 0.56)$



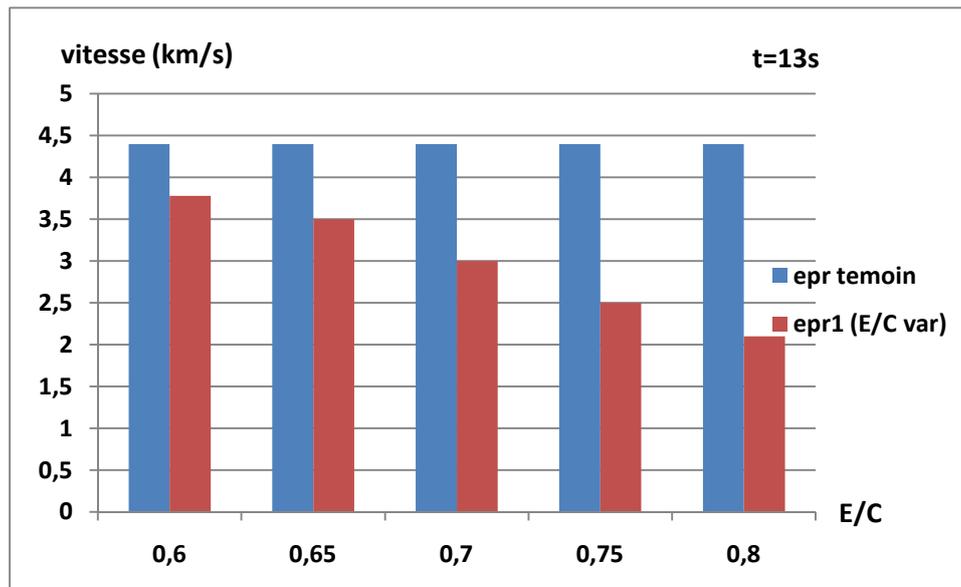
**Figure IV.14.** vitesse de son  $V = f(t ; E/C=0.56)$

- **Commentaire.** La figure ci-dessus montre que la vitesse de son diminue avec l'augmentation de temps de vibration et un rapport E/C constant, ces variations sont due au tassement des gros granulats (t augmente, la hauteur de concentration des gros granulats diminue donc la vitesse du son diminue).

**IV.2.2.3. Troisième série d'éprouvettes**

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	distance (m)	vitesse (km/s)
Epr1	0,6	13	0,32	3,78
Epr2				3,8
Epr1	0,65			3,5
Epr2				3,4
Epr1	0,7			3
Epr2				2,95
Epr1	0,75			2,5
Epr2				2,4
Epr1	0,8			2,1
Epr2				2,15

**Tableau .IV.14.** vitesse de son  $V = f(E/C ; t=13s)$ .



**Figure IV.15.** vitesse  $V = f(t = 13s \text{ et } E/C)$ .

- **Commentaire.** la vitesse ultrasonique diminue considérablement en augmentant le rapport E/C. et ce du à l'effet que l'onde sonore se propage moins vite dans un béton de faible compacité.

### IV.2.3. Résultats d'essai de résistance à la compression

#### IV.2.3.1. Première série d'éprouvettes

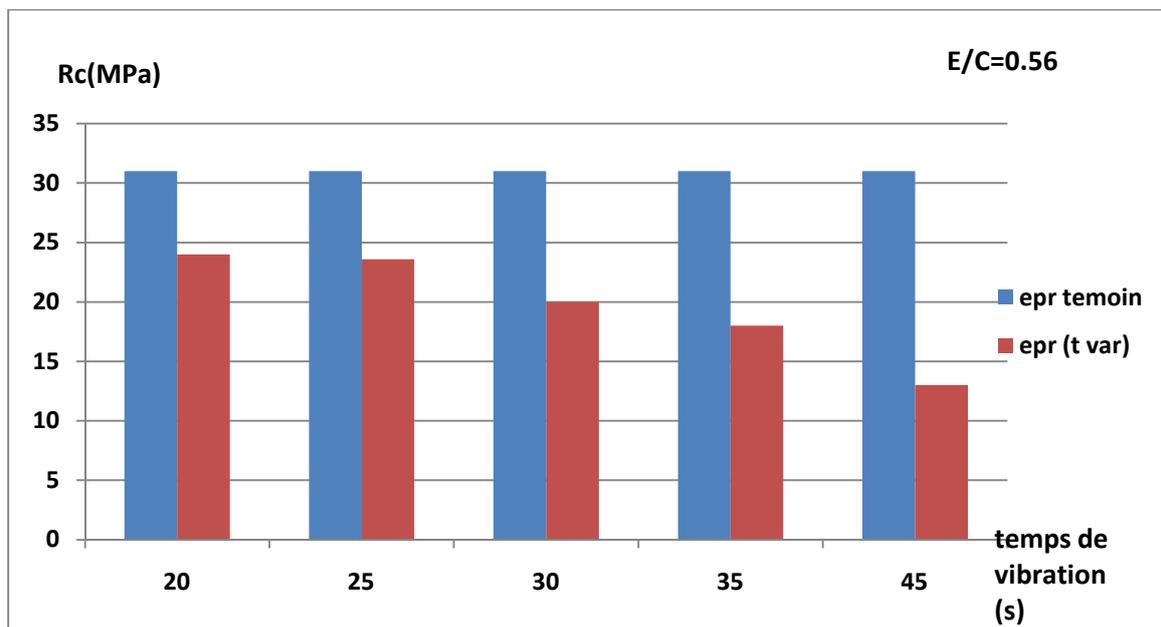
éprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	résistance à la compression $R_c$ (Mpa)
01	0,56	11	31
02	0.56	14	32

**Tableau IV.15.** Résistance à la compression  $R_c = f(t ; E/C=0.56)$ .

**IV.2.3.2. Deuxième série d'éprouvettes**

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	résistance à la compression( Mpa)
Epr1	0,56	20	29
Epr2		20	29,6
Epr1	0,56	25	27,3
Epr2		25	27
Epr1	0,56	30	24
Epr2		30	24
Epr1	0,56	35	22
Epr2		35	23
Epr1	0,56	45	20
Epr2		45	20

**Tableau. IV.16.** Résistance à la compression  $R_c = f(t ; E/C=0.56)$ .



**Figure IV.16.** Résistance à la compression  $R_c = f(t ; E/C=0.56)$ .

- **Commentaire.** la figure montre que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de temps de la vibration

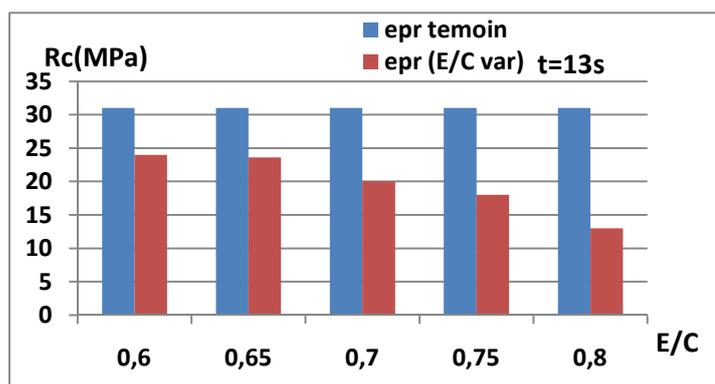


**Figure IV.17.** Mode de rupture d'éprouvette pour  $t > 20s$

#### IV.2.3.3. Troisième série d'éprouvettes

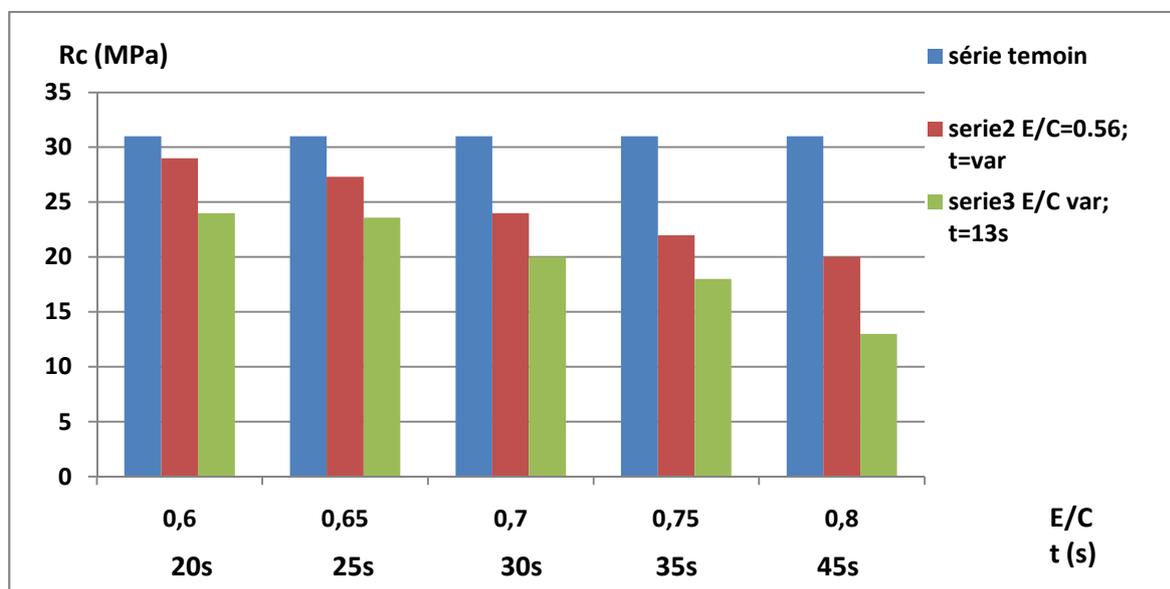
Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	résistance à la compression( Mpa)
Epr1	0,6	13	24
Epr2	0,6		24,3
Epr1	0,65		23,6
Epr2	0,65		23,8
Epr1	0,7		20
Epr2	0,7		21
Epr1	0,75		18
Epr2	0,75		17
Epr1	0,8		13
Epr2	0,8		13,5

**Tableau .IV.17.** Résistance à la compression  $R_c = f(E/C ; t=13s)$ .



**Figure IV.18.** Résistance à la compression  $R_c = f(t=13s ; E/C)$ .

**Figure. IV.19.** mode de rupture d'éprouvette  $E/C > 0.65$ .

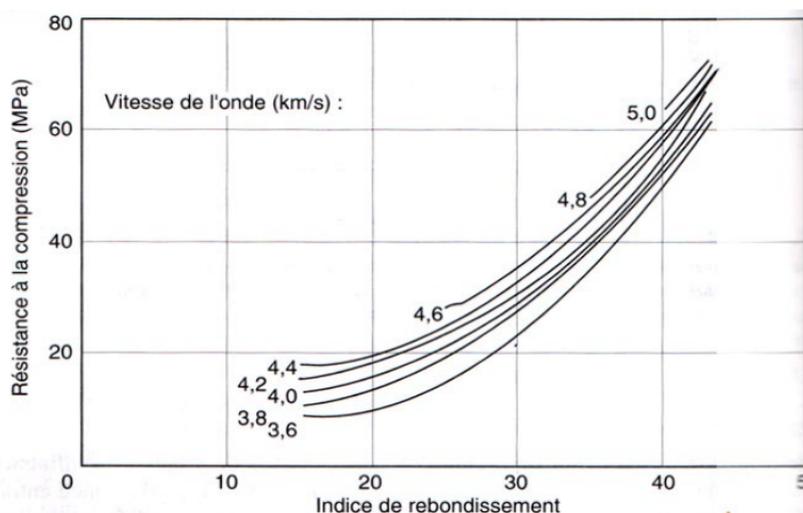


**Figure IV.20.** Résistance à la compression  $R_c = f(t ; E/C)$ .

- **Commentaire.** De la figure ci-dessus on peut constater que la résistance à la compression diminue considérablement pour la série 03 des éprouvettes par rapport à la série 02, et la résistance de ces deux séries est faible par rapport à la série témoin.

### **IV.3. Contrôle du béton par la méthode combinée**

Le contrôle du béton par la méthode non destructive combinée permet d'atteindre une meilleure appréciation de la résistance. Plusieurs auteurs ont proposé des formules et des abaques (Bellander (Suède), Tanigawa, Yamada, Kosaka (Japon)...etc), qui mettent en corrélation la résistance du béton avec la vitesse de son et l'indice de rebondissement.



**Figure IV.21.** : Courbe d'estimation de la résistance à la compression par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. Bellander (1977)

### IV.3.1. Résistance à la compression

L'absence d'une formule universelle de la méthode combinée nous a amené à choisir la formule de Bellander (Suède) pour le calcul de la résistance du béton.

$$R = 0.00082N^3 + 11.03 V - 32.7$$

**R** résistance du béton.

**N** indice de rebondissement.

**V** vitesse des ultrasons.

▪ **t variable**

E/C	temps de vibration (s)	N moyenne indice scléromètre	vitesse V (km/s)	R (Mpa)
0,56	20	31,00	4,351	39,72
	25	30,57	4,25	37,61
	30	26,14	3,93	25,30
	35	26,57	3,4	20,19
	45	25.28	3,31	17.06

**Tableau .IV.18.** Résistance du béton pour t variable

▪ E/C variable

E/C	temps de vibration (s)	N moyenne indice sclero	vitesse V (km/s)	R (Mpa)
0,60	13	29,71	3,78	30,51
0,65		27,14	3,5	22,30
0,70		19,86	3	6,81
0,75		15,29	2,5	/
0,80		12,14	2,1	/

**Tableau. IV.19.** Résistance du béton pour E/C variable**IV.3.2.Détermination des propriétés des mélanges****IV.3.2.1.Module d'élasticité****IV.3.2.1.1.Module d'élasticité dynamique**

Les vitesses de propagations des ondes ultrasoniques dépendent de module d'élasticité et de la densité du béton [13]. Pour calculer le module d'élasticité dynamique et statique nous avons utilisé les formules proposées par MUNZER. H [13].

$$E_d = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \gamma v^2$$

Où  $\gamma$  : masse volumique du béton,

$\nu = 0,2$  (coefficient de Poisson),

V : vitesse du son [km/s]

-La masse volumique peut être estimée selon l'équation suivante :  $\gamma v = 1,67 + 0,155 V$

**a) Estimation de la masse volumique**

- t : variable

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	distance (m)	vitesse (km/s)	Masse volumique $\gamma_v$ (t/m <sup>3</sup> )
Epr1	0,56	20	0,32	4,351	2,34
Epr2		20		4,4	2,35
Epr1	0,56	25		4,25	2,33
Epr2		25		4,18	2,32
Epr1	0,56	30		3,93	2,28
Epr2		30		3,9	2,27
Epr1	0,56	35		3,4	2,20
Epr2		35		3,42	2,20
Epr1	0,56	45		3,31	2,18
Epr2		45		3,2	2,17

**Tableau IV.20** masse volumique du béton (t variable)

- E/C : variable

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	distance (m)	vitesse (km/s)	M V (t/m <sup>3</sup> )
Epr1	0,6	13	0,32	3,78	2,26
Epr2				3,8	2,26
Epr1	0,65			3,5	2,21
Epr2				3,4	2,20
Epr1	0,7			3	2,14
Epr2				2,95	2,13
Epr1	0,75			2,5	2,06
Epr2				2,4	2,04
Epr1	0,8			2,1	2,00
Epr2				2,15	2,00

**Tableau .IV.21.** Masse volumique du béton (E/C variable)

**b) Estimation de module d'élasticité dynamique**

- t : variable

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	vitesse (km/s)	Masse volumique $\gamma v$ (t/m <sup>3</sup> )	Ed ( Gpa)
Epr1	0,56	20	4,351	2,34	39,94
Epr2		20	4,4	2,35	40,98
Epr1	0,56	25	4,25	2,33	37,86
Epr2		25	4,18	2,32	36,45
Epr1	0,56	30	3,93	2,28	31,68
Epr2		30	3,9	2,27	31,14
Epr1	0,56	35	3,4	2,20	22,86
Epr2		35	3,42	2,20	23,16
Epr1	0,56	45	3,31	2,18	21,53
Epr2		45	3,2	2,17	19,96

**Tableau. IV.22.** Module d'élasticité dynamique (t variable)

- E/C : variable

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	vitesse (km/s)	Masse volumique $\gamma v$ (t/m <sup>3</sup> )	Ed ( Gpa)
Epr1	0,6	13	3,78	2,26	29,01
Epr2			3,8	2,26	29,36
Epr1	0,65		3,5	2,21	24,39
Epr2			3,4	2,20	22,86
Epr1	0,7		3	2,14	17,29
Epr2			2,95	2,13	16,66
Epr1	0,75		2,5	2,06	11,57
Epr2			2,4	2,04	10,59
Epr1	0,8		2,1	2,00	7,92
Epr2			2,15	2,00	8,33

**Tableau. IV.23.** Module d'élasticité dynamique (E/C variable)

**IV.3.2.1.2. Module d'élasticité statique**

$$E_c = K V^2$$

$$k = 1.68 \quad \text{pour } t \geq 180 \text{ jours;}$$

$$k = t^{0.1} \quad \text{pour } t < 180 \text{ jours ; } \quad t : \text{âge du béton en jours}$$

Pour 28 jours  $K = 1.395$

▪ **t : variable**

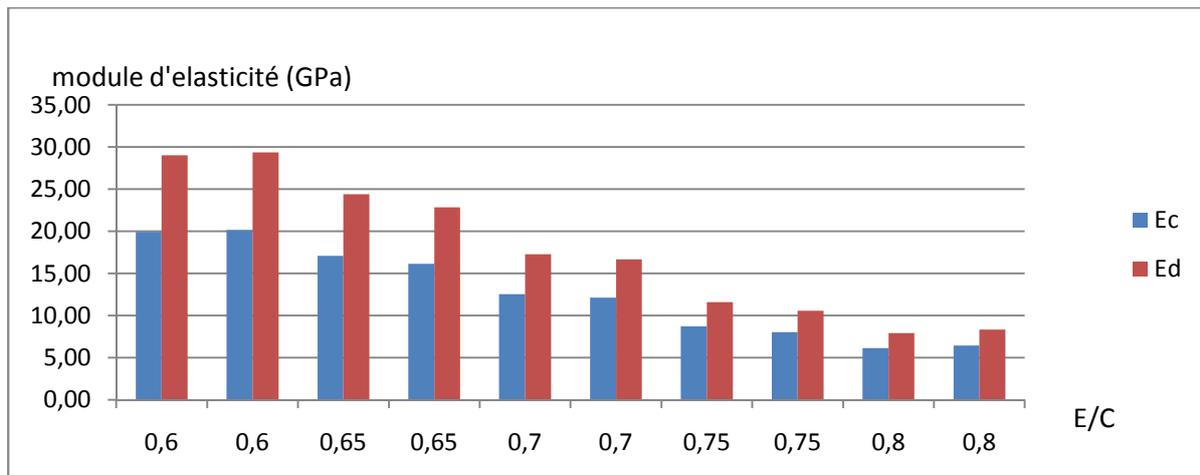
Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	vitesse (km/s)	$E_c$ (GPa)
Epr1	0,56	20	4,351	26,41
Epr2		20	4,4	27,01
Epr1	0,56	25	4,25	25,20
Epr2		25	4,18	24,37
Epr1	0,56	30	3,93	21,55
Epr2		30	3,9	21,22
Epr1	0,56	35	3,4	16,13
Epr2		35	3,42	16,32
Epr1	0,56	45	3,31	15,28
Epr2		45	3,2	14,28

**Tableau .IV.24.** Module d'élasticité statique (t variable)

▪ E/C variable

Eprouvettes	E/C	temps de vibration (s)	vitesse (km/s)	Ec (GPa)
Epr1	0,6	13	3,78	19,93
Epr2			3,8	20,14
Epr1	0,65		3,5	17,09
Epr2			3,4	16,13
Epr1	0,7		3	12,56
Epr2			2,95	12,14
Epr1	0,75		2,5	8,72
Epr2			2,4	8,04
Epr1	0,8		2,1	6,15
Epr2			2,15	6,45

**Tableau .IV.25** module d'élasticité statique (E/C variable)



**Figure. IV.22** module d'élasticité

- **Commentaire.** la figure ci-dessus montre que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de rapport E/C et le temps de vibration, cette diminution est due à l'hétérogénéité du béton.

**IV.4. Analyse et discussion des résultats****IV.4.1. indice de rebondissement**

- pour un rapport E/C égale à 0.56, nous constatons que l'indice de rebondissement R diminue en fonction de la hauteur des éprouvettes pour les temps de vibration longs.
- pour un temps de vibration constant (13s) nous constatons que l'indice R est en décroissance légère pour un rapport E/C égale à 0.6.
- pour le rapport E/C supérieur à 0.70 on constate une diminution considérable de l'indice(R) sur toute la hauteur des éprouvettes.
- nous avons également constaté que l'indice de rebondissement (R) est élevé aux parties inférieures des éprouvettes par rapport aux parties supérieures.

**IV.4.2. Vitesse des ultrasons**

- Pour un rapport E/C égale à 0.56, la vitesse des ultrasons diminue progressivement en augmentant le temps de vibration.
- Pour le rapport E/C supérieurs à 0.65 la vitesse des ultrasons diminue considérablement.
- La vitesse de son diminue quand le module d'élasticité diminue.

**IV.4.3. Résistance à la compression**

- E/C= 0.56, la résistance du béton est de bonne qualité pour les temps de vibration 13 s et 20 s, et elle est en décroissance pour les temps de vibration supérieurs à 25 s.
- Pour un temps de vibration constant (13s), le béton a une faible résistance à la compression pour le rapport E/C supérieurs ou égale à 0.70.
- Lors de l'écrasement, nous avons constaté que les éprouvettes dont le temps de vibration supérieures à 25 s s'écrasent dans la partie supérieure de l'éprouvette, contrairement aux éprouvettes dont le temps de vibration inférieur à 20 s leur mode d'écrasement est l'apparition des fissures le long de l'éprouvette avec un cisaillement des granulats.

De ce qui précède on peut tirer ce qui suit

- ✓ La variation de l'indice de rebondissement (R) qui indique la dureté du béton montre qu'il y a un tassement des gros granulats au fond des éprouvettes et de ce fait une répartition non homogène des constituants sur toute la hauteur des

éprouvettes ce qui conduit à dire qu'il y a une ségrégation interne et verticale, ce phénomène est aggravé par une longue vibration et un rapport E/C élevé pour un béton vibré.

- ✓ La variation de vitesse ultrasonique (faibles vitesses) montre aussi qu'il ya des vides entre les grains formés par un mauvais arrangement des granulats et l'évaporation de l'eau excédentaire.

#### **IV.4.4.module d'élasticité**

- La variation des valeurs de module d'élasticité est due à l'hétérogénéité du béton causée par un rapport E/C élevé et à une vibration excessive et à la diminution de la masse volumique du béton.

#### **IV.5.Conclusion**

Les résultats expérimentaux montrent qu'une vibration trop longue et un rapport E/C élevé sont les paramètres principaux de la ségrégation de béton, et de ce fait les propriétés mécaniques de matériau se trouvent dégradées.

## ***Conclusion Générale***

### **Conclusion générale**

L'étude que nous avons réalisé montre que les essais non destructifs sont des moyens efficaces pour investiguer la ségrégation interne du béton et estimer sa résistance à partir de la vitesse ultrasoniques et l'indice de rebondissement

Pour le béton ordinaire (béton vibré) il y a lieu de choisir le temps de vibration adéquat pour chaque consistance du béton. Dans le cas où la densité de ferrailage ou les conditions de mise en place du béton exige des consistances fluides et pour parer au phénomène de ségrégation il y a lieu d'employer des bétons dont la fluidité n'est pas due à l'excès d'eau, en utilisant des adjuvants, et un béton qui ne nécessite pas une mise en place par vibration tel que le béton autolaçant, autonivellant...etc.

### **Perspectives et recommandations**

L'étude de phénomène de ségrégation que nous avons réalisé s'est limitée aux paramètres de temps de vibration du béton ordinaire et le rapport eau/ciment (E/C), d'autres études demeurent envisageables

- ✓ Considérer le temps de malaxage comme paramètre engendrant la ségrégation du béton.
- ✓ Etude de comportement mécanique des bétons ségrégés (autoplaçant, béton fibré...etc).
- ✓ Passer d'une étude classique à une simulation numérique de la ségrégation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **AFGC** « Recommandations pour l'emploi des Bétons AutoPlaçants ». Janvier 2008.
- [2] **A. Lassalle, C. Legrand** « ségrégation externe des bétons frais ; modèle expérimentale et influence des principaux facteurs » p 253.
- [3] **BETHMONT Sandrine** « mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP). Etude expérimentale des interactions granulaires. Thèse de Doctorat .2005
- [4] **CIMBETON** Les bétons « formulation, fabrication et mise en œuvre ». Tome 02.
- [5] **François de Larrard** « construire en béton. essentiel sur les matériaux ».pg 48.2002.
- [6] **François de Larrard** « structures granulaires et formulation des bétons » ouvrage d'art n° OA 34.pg 103.
- [7] **François Derrien, Gérard Béranger et Sylvain Audisio** « Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels » 2010.
- [8] **GRINI Abdelouaheb, BENOUIS Abdelhalim** «Investigation de la ségrégation des bétons par les ultrasons. ». 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015.
- [9] **Guillaume Grampeix-Nicolas Roussel-Jérôme Dupoirier** « Influence de la vibration lors de la mise en œuvre du béton ». XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [10] **HANNACHI SAMIA** « évaluation de la résistance à la compression du béton sur site : application de la méthode combinée ». Thèse de Doctorat 2015. Université Mentouri I Constantine.Algerie.
- [11]**Jean FESTA et George DREUX** ‘ nouveau guide du béton et de ses constituants’ Huitième édition EYROLLES.
- [12]**M. Sedky, C. Legrand, M. Barrioulet.** « Influence de la concentration en granulats et du temps de vibration sur la ségrégation interne dans le béton frais ».

[13] **MUNZER Hassan** « critère découlant d'essais de chargement pour l'évaluation de comportement des ponts en béton et pour le choix de la précontrainte » thèse de Doctorat N° 1296 (1994). Lausanne.

[14] **N.BOUHAMOU et al.** « Influence des paramètres de composition sur le comportement du Béton autoplaçant à l'état frais ». Afrique SCIENCE 04(1) (2008) 1 - 20.

[15] **POULLAIN Philippe** « Etude comparative de l'écoulement d'un fluide viscoplastique dans une maquette de malaxeur pour béton: PIV, IRM ET SIMULATION NUMÉRIQUE » Thèse de doctorat 2003. université de Nantes.

[16] **S. BENSEBTI - S. AGGOUNE - H. HOUARI** « essai de caractérisation expérimentale de la ségrégation verticale des bétons autoplaçants ». Sciences & Technologie B – N°25, Juin 2007, 59-64.

[17] **Thierry SEDRAN** « rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autonivelant ». Thèse de doctorat 1999.

[18] **Thi Lien Huong Nguyen - Nicolas Roussel- Philippe Coussot** « Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons ». Revue. Volume 10 , pages 1 à 10.

[19] **Z. Toutou, C. Lanos, Y. Mélinge, N. Roussel** « Modèle de viscosité multi-échelle : de la pâte de ciment au micro-béton ».