

T/624. 059

# Mémoire de Magister

**Présenté à l'Université de Guelma  
Faculté des Sciences et de l'Ingénierie**

Département de : Génie Civil  
Spécialité : Mécanique des Matériaux de Sols  
et Structures

Présenté par : **FRIHI NACERA Née KHALDI**

---

---

**DETERMINATION DES PROPRIETES DES BETONS PAR  
ULTRASONS  
(INFLUENCE DE LA COMPOSITION SUR LA RESISTANCE ET LE  
MODULE ELASTIQUE)**

---

---

Sous la Direction du : Docteur **BENOUIS A/HALIM**

---

Mai 2005

---

Soutenu le : ..... devant la Commission d'Examen

**\* JURY \***

MM.

Guenfoud.M

Professeur, Université 08 mai Guelma, Président.

Bcnouis.A

Maître de conférence, Université 08 mai Guelma, Rapporteur.

Belachia.M

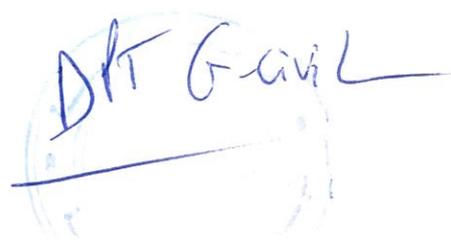
Maître de conférence, Université 08 mai Guelma, Examineur.

Cherail.Y

Docteur, Université 08 mai Guelma, Examineur.

Aoun.H

Docteur, Université de Annaba, Examineur.



# Remerciements

Je tiens à remercier avant tout l'ensemble des personnes qui ont participé au bon déroulement de mon Travail, et qui m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Je témoigne donc toute ma reconnaissance :

- À Mon promoteur Docteur BENOUIS A/HALIM qui a consacré son précieux temps pour m'aider à réaliser ce modeste travail et qui s'est toujours rendu disponible pour me renseigner et a contribué à l'avancement du travail.
- À Monsieur le directeur du laboratoire LGCH de l'université de Guelma le Professeur : Guenfoud Mohamed qui nous a accueilli au sein du laboratoire .

Mes remerciements s'adressent aussi :

- Aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail, qu'ils trouvent ici ma sincère et profonde gratitude.
- À Monsieur le chef du département de génie civil de l'université de Guelma M. Nouaouria Med Salah pour son aide .
- Un grand merci à Melle Ksouri Lynda qui n'a pas hésité à m'aider à n'importe quel moment ainsi à tous les membres du centre de calcul et le département de génie civil de l'université de Guelma.
- Un grand merci aux personnels du laboratoire de travaux publics Guelma .



## ***D***édicace

Je dédie ce modeste travail :

- À mon père.
- À la source de tendresse ma mère.
- À mon mari Salim.
- À mes frères, mes sœurs, mes beaux frères, mes belles sœurs.
- À ma belle mère, tonton Moustafa et à toute ma famille.
- À mes amies : Nedjla, Assia, Chiraz, Ghania pour leur soutien et aide surtout pendant le coulage du béton et dans les moments difficiles ainsi que tous mes collègues à l'université de Guelma.
- À mes camarades de la promotion de Magister 2003/2004.
- À tous ceux qui ont participé à ma formation.

***N***ACERA



# SOMMAIRE

## *PRESENTATION ET OBJECTIF DE L'ETUDE*

i	Introduction.....	01
ii	Objectif.....	02
iii	Présentation de l'étude.....	02

## CHAPITRE I

### *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

I	NOTIONS GENERALES.....	03
I.1	Béton.....	03
I.1.1	Composition.....	03
I.2.2	Préparation.....	04
I.2	Critères généraux.....	06
I.2.1	Résistance.....	06
I.2.2	Rapport E/C.....	06
I.2.3	Dosage en ciment.....	07
I.2.4	Dosage des granulats.....	07
I.2.5	Dosage de l'eau et plasticité.....	07
I.2.6	Porosité.....	08
I.2	Notions d'excitation et de propagation des sons et des ultrasons.....	09
I.2.1	Son.....	09
I.2.1.1	Vitesse du son.....	09
I.2.1.2	Réfraction, réflexion et interférence.....	10

<b>I.2.2</b>	Ultrasons.....	11
<b>I.2.2.1</b>	Production et détection.....	11
<b>I.2.2.2</b>	Applications.....	11
<b>I.2.3</b>	Production des sons et des ultra-sons.....	12
<b>I.2.3.1</b>	Mesure des constantes élasto-dynamiques.....	13
<b>I.2.3.2</b>	Détermination de la résistance du béton.....	14

## **CHAPITRE II**

### **DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES**

<b>II</b>	<b>CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....</b>	<b>16</b>
<b>II.1</b>	Sables.....	16
<b>II.1.1</b>	Caractéristiques physiques des sables utilisés.....	16
<b>II.1.2</b>	Module de finesse.....	17
<b>II.2</b>	Graviers.....	17
<b>II.2.1</b>	Dénomination des graviers.....	17
<b>II.2.2</b>	Caractéristiques physiques des graviers utilisés.....	17
<b>II.2.3</b>	Caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.....	18
<b>II.2.4</b>	Les caractéristiques chimiques des graviers utilisés.....	19
<b>II.3</b>	Ciment.....	20
<b>II.3.1</b>	Caractéristiques physiques.....	20
<b>II.4</b>	Eau de gâchage.....	20

## **CHAPITRE III**

### **PRESENTATION DES METHODES UTILISEES**

<b>III</b>	<b>PRESENTATION DES METHODES UTILISEES.....</b>	<b>21</b>
<b>III.1</b>	Auscultation dynamique.....	21

<b>III.1.1</b>	Principes de base.....	22
<b>III.1.2</b>	Description de l'appareil.....	22
<b>III.1.3</b>	Résultats des essais et évaluation.....	22
	a-Positionnement des transducteurs.....	22
	b- Mesure du temps de propagation et de la longueur de parcours.....	23
	c- Evaluation de l'homogénéité et de l'uniformité du béton.....	25
	d- Présence de fissures, vides, zones dégradées.....	26
	e- Corrélation entre vitesse de propagation et résistance du béton.....	26
	f- Estimation du temps de propagation .....	26
	g- Estimation du module élastique.....	27
	h- Relation vitesse du son-résistance.....	27
<b>III.2</b>	Essai Sclérométrique.....	29
<b>III.2.1</b>	Principe de base.....	29
<b>III.2.2</b>	Utilisation du scléromètre.....	30
<b>III.3</b>	Essai destructif.....	31
<b>III.3.1</b>	Présentation de la presse utilisée.....	31

## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE EXPERIMENTALE**

<b>IV</b>	<b>ETUDE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>32</b>
<b>IV.1</b>	Formulation des bétons.....	32
<b>IV.1.1</b>	Méthodes de composition des bétons.....	32
<b>IV.1.2</b>	Méthodes des courbes de références.....	32
<b>IV.2</b>	Les essais.....	33
<b>IV.2.1</b>	Analyses granulométriques .....	33
<b>IV.2.2</b>	Essai d'humidité.....	36
<b>IV.2.3</b>	Les compositions du béton.....	62
<b>IV.3</b>	Confection des éprouvettes.....	63

IV.4 Résultats d'essais sur les éprouvettes.....	65
--	----

**CHAPITRE V**

**INTERPRETATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS**

<b>V INTERPRETATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS.....</b>	<b>96</b>
V.1 Introduction .....	96
V.2 Influence du rapport E/C.....	96
V.2.1 La résistance.....	96
V.3 Influence du rapport S/S+G.....	100
V.3.1 la résistance.....	100
V.4 Etude comparative des résistances .....	103
V.5 Relation entre les modules élastiques dynamique et statique.....	111
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>122</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>123</b>
<b>ANNEXE I.....</b>	<b>126</b>
<b>ANNEXE II.....</b>	<b>133</b>

## ***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau I.2.1</b>	Valeurs des constantes élasto-dynamiques de quelques matériaux Usuels.....	14
<b>Tableau II.1.1</b>	Caractéristiques physiques des sables utilisés.....	16
<b>Tableau II.1.2</b>	Module des finesse.....	17
<b>Tableau II.2.1</b>	Dénomination des graviers.....	17
<b>Tableau II.2.2</b>	Caractéristiques physiques des graviers utilisés.....	18
<b>Tableau II.2.3</b>	Caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.....	18
<b>Tableau II.2.4</b>	Analyse chimique du gravier.....	19
<b>Tableau II.3.1</b>	Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	20
<b>Tableau III.3.1</b>	Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions.....	25
<b>Tableau IV.2.1</b>	Analyse granulométriques B4 du sable de mer.....	33
<b>Tableau IV.2.2</b>	Analyse granulométriques B4 du gravier 5/15.....	34
<b>Tableau IV.2.3</b>	Analyse granulométriques B4 du gravier 15/25.....	35
<b>Tableau IV.2.4</b>	Détermination du poids de l'échantillon en fonction de la grosseur des grains.....	36
<b>Tableau IV.2.5</b>	Essai d'humidité B4.....	37
<b>Tableau IV.2.6</b>	Analyse granulométriques B5 du sable de mer .....	40
<b>Tableau IV.2.7</b>	Analyse granulométriques B5 du gravier 5/15.....	41
<b>Tableau IV.2.8</b>	Analyse granulométriques B5 du gravier 15/25.....	41
<b>Tableau IV.2.9</b>	Essai d'humidité B5.....	42
<b>Tableau IV.2.10</b>	Analyse granulométriques B6 du sable de mer .....	45
<b>Tableau IV.2.11</b>	Analyse granulométriques B6 du gravier 5/15.....	46
<b>Tableau IV.2.12</b>	Analyse granulométriques B6 du gravier 15/25.....	47
<b>Tableau IV.2.13</b>	Essai d'humidité B6.....	48
<b>Tableau IV.2.14</b>	Analyse granulométriques B7 du sable de mer .....	51

<b>Tableau IV.2.15</b>	Analyse granulométriques B7 du gravier 5/15.....	52
<b>Tableau IV.2.16</b>	Analyse granulométriques B7 du gravier 15/25.....	53
<b>Tableau IV.2.17</b>	Essai d'humidité B7.....	57
<b>Tableau IV.2.18</b>	Analyse granulométriques B8 du sable de mer .....	57
<b>Tableau IV.2.19</b>	Analyse granulométriques B8 du gravier 5/15.....	57
<b>Tableau IV.2.20</b>	Analyse granulométriques B8 du gravier 15/25.....	58
<b>Tableau IV.2.21</b>	Essai d'humidité B8.....	59
<b>Tableau IV.2.22</b>	Compositions des différents bétons .....	62
<b>Tableaux IV.4</b>	Résultats d'essais.....	65
<b>Tableau IV.4.1</b>	Les normes.....	95
<b>Tableau V.2.1</b>	Relation résistance- vitesse de propagation des ultrasons.....	96
<b>Tableau V.2.1.1</b>	Relation vpu-résistance pour deux rapports E/C différents.....	97
<b>Tableaux V.4.1</b>	Variation de la résistance en fonction de l'âge du béton selon les différentes méthodes utilisées.....	103
<b>Tableaux V.5.1</b>	Valeurs de module d'élasticité statique et dynamique.....	111
<b>Tableaux V.5.2</b>	Evolution des modules en fonction des vpu.....	117
<b>Tableaux A.I.1</b>	Evolution de la vitesse des ultrasons en fonction de l'âge du béton...	123
<b>Tableau A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons.....	130

## ***LISTE DES FIGURES***

<b>Figure I.2.1</b>	Evaluation non destructive pour ultrasons .....	12
<b>Figure III .1.1</b>	Appareillage ultrasonique utilisé.....	22
<b>Figure III .1.2</b>	Type de propagation d'ondes.....	23
<b>Figure III.1.3</b>	Mesure du temps de propagation et de la longueur de parcours.....	23
<b>Figure III.1.4</b>	Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface.....	24
<b>Figure III.1.5</b>	Estimation des modules élastiques statiques et dynamiques à partir de la vitesse de propagation.....	27
<b>Figure III.2.1</b>	Appareillage sclérométrique utilisé.....	29
<b>Figure III.2.2</b>	Utilisation du scléromètre.....	30
<b>Figure III.3.1</b>	La presse de compression utilisée .....	31
<b>Figure IV.2.1</b>	Appareillage tamiseuse .....	33
<b>Figure IV.2.2</b>	Appareillage four.....	36
<b>Figure IV.2.3</b>	Analyse granulométrique B4 .....	38
<b>Figure IV.2.4</b>	Analyse granulométrique B5 .....	43
<b>Figure IV.2.5</b>	Analyse granulométrique B6 .....	49
<b>Figure IV.2.6</b>	Analyse granulométrique B7 .....	55
<b>Figure IV.2.7</b>	Analyse granulométrique B8.....	60
<b>Figure IV.3.1</b>	Les moules utilisés.....	63
<b>Figure V.2.1</b>	Relation vpu-résistance pour différents rapports E/C.....	97
<b>Figure V.2.1.1</b>	Relation vpu-résistance pour deux rapports E/C différents.....	98
<b>Figure V.2.1.2</b>	Courbe exponentielle et courbe polynomiale.....	98
<b>Figure V.3.1</b>	Relation vpu-résistance pour différents rapports S/S+G.....	100
<b>Figure V.3.2</b>	Relation vpu-résistance à 07 jours.....	101
<b>Figure V.3.3</b>	Relation vpu-résistance à 14 jours.....	101

<b>Figure V.3.4</b>	Relation vpu-résistance à 28 jours.....	101
<b>Figures V.4.1.1</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B1.....	106
<b>Figures V.4.1.2</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B2.....	106
<b>Figures V.4.1.3</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B3.....	107
<b>Figures V.4.1.4</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B4.....	107
<b>Figures V.4.1.5</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B5.....	108
<b>Figures V.4.1.6</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B6.....	108
<b>Figures V.4.1.7</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B7.....	109
<b>Figures V.4.1.8</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B8.....	109
<b>Figures V.4.1.9</b>	Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisées pour le béton B9.....	110
<b>Figures V.5.1</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B1 .....	113
<b>Figures V.5.2</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B2 .....	113
<b>Figures V.5.3</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B3 .....	114
<b>Figures V.5.4</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B5 .....	114
<b>Figures V.5.5</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B6 .....	115
<b>Figures V.5.6</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B7 .....	115
<b>Figures V.5.7</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B8 .....	116
<b>Figures V.5.8</b>	Evolution des modules en fonction du temps pour le béton B9 .....	116

<b>Figure V.5.9</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B1... ..	118
<b>Figure V.5.10</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B2... ..	118
<b>Figure V.5.11</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B3... ..	119
<b>Figure V.5.12</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B5... ..	119
<b>Figure V.5.13</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B6... ..	120
<b>Figure V.5.14</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B7... ..	120
<b>Figure V.5.15</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B8... ..	121
<b>Figure V.5.16</b>	Evolution des modules en fonction des vpu pour le béton B9... ..	121
<b>Figure A.I.1</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B1.....	125
<b>Figure A.I.2</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B2.....	125
<b>Figure A.I.3</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B3.....	126
<b>Figure A.I.4</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B4.....	126
<b>Figure A.I.5</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B5.....	127
<b>Figure A.I.6</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B6.....	127
<b>Figure A.I.7</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B7.....	128
<b>Figure A.I.8</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B8.....	128
<b>Figure A.I.9</b>	Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons pour le béton B9.....	129

<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B1.....	131
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B2.....	131
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B3.....	131
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B4.....	132
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B5.....	132
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B6.....	132
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B7.....	133
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B8.....	133
<b>Figure A.II.1</b>	Evolution du module dynamique en fonction des vpu pour le béton	
	B9.....	133

## NOTATIONS

$f_{cj}$	[Mpa]	Résistance en compression à j jours
$E_S$	[Mpa]	Module élastique statique
$E_d$	[Mpa]	Module élastique dynamique
$G_d$	[Mpa]	Module d'élasticité transversale dynamique
$V_T$	[Km/s]	Vitesse de propagation des ondes transversales
$V_L$	[Km/s]	Vitesse de propagation des ondes longitudinales
$V$	[Km/s]	Vitesse de propagation
$\gamma$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Masse volumique
$\lambda$	[Hz]	Fréquence de ultrasons
$L$	[ mm ]	Longueur de parcours
$T$	[ $\mu$ s ]	Temps de propagation
$R$	[Mpa]	Résistance du béton
$P_{max}$	[KN]	Charge appliquée
$S$	[ Mpa ]	Ecart type
$R_c$	[ g ]	Refus cumulé
$W$	[ % ]	Humidité
$n$	[ - ]	Nombre de coups
$v_{pu}$	[ m/s ]	Vitesse des pulsations ultrasoniques
$E/C$	[ - ]	Rapport Eau/Ciment
$S/S+G$	[ - ]	Rapport Sable/Granulats
$\mu_d$	[ - ]	Coefficient de Poisson dynamique
$\mu_s$	[ - ]	Coefficient de Poisson statique

<b>E.S.V</b>	[ - ]	Equivalent de sable visuel
<b>E.S.P</b>	[ - ]	Equivalent de sable Piston
<b>M<sub>f</sub></b>	[ - ]	Module de finesse
<b>L<sub>A</sub></b>	[ - ]	Coefficient de Los Angeles
<b>MD</b>	[ - ]	Coefficient de Micro Deval

---

**Résumé :**

La mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton peut nous renseigner sur :

- \* l'homogénéité du béton
- \* l'estimation du module élastique et de la résistance en compression
- \* l'estimation de la profondeur des fissures

Généralement la relation entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance peut être établie. Seulement des différences peuvent exister, si on considère différentes compositions et âges des bétons, dans la relation vitesse des ultrasons / résistance en compression car les ultrasons peuvent être influencés par des propriétés des bétons qui n'affectent pas la résistance en compression au même degré.

On a étudié, dans ce travail, les incertitudes entre la vpu et  $f_c$ , introduites par la différence des compositions. On s'est aussi intéressé à quantifier le module élastique par cette technique, appelé module élastique dynamique. Différentes compositions de béton ont été utilisées avec variation des rapports eau/ciment (E/C) et granulats (S/S+G)

**Mots –clés :** Essai non destructif, ultrasons, résistance en compression, béton, propagation des ondes, module élastique.

---

## الخلاصة

إن قياس سرعة توليد الأمواج الفوق صوتية عبر الخرسانة يمكن أن يبيننا عن:

\*تجانس الخرسانة

\*تقدير المعامل المطاطي والمقاومة تحت الضغظ

\*تقدير عمق الشقوق

عموما يمكن تأسيس علاقة بين سرعة توليد الأمواج الفوق صوتية والمقاومة. غير انه يمكن ايجاد اختلافات ، إذا أخذنا تراكيب وأعمار متعددة من الخرسانة في العلاقة سرعة الأمواج الفوق صوتية/مقاومة في الضغظ لأن الأمواج الفوق صوتية يمكن أن تتأثر بخصائص الخرسانة التي لا تؤثر على مقاومة الخرسانة تحت الضغظ في الدرجة نفسها.

لقد درسنا في هذا العمل الإرتياب بين سرعة توليد الأمواج الفوق صوتية والمقاومة باختلاف التراكيب. واهتمنا أيضا بتحديد المعامل المطاطي عن طريق هذه التقنية، و نطلق عليه المعامل المطاطي الديناميكي.

لقد استعملنا تراكيب مختلفة للخرسانة مع تغيير النسبة ماء/إسمنت (E/C) و الحصى (S/S+G).

كلمات رئيسية: تجربة غير مخربة، الأمواج الفوق صوتية , مقاومة في الضغظ، خرسانة، انتشار الأمواج، المعامل المطاطي.

---

## Summary

The velocity measurement of propagation of ultrasonic waves through the concrete can inform us about:

- \* homogeneity of the concrete
- \* the estimate of the elastic module and resistance in compression
- \* the estimate depth of the fissures

Generally the relation between the propagation velocity of the ultrasounds and resistance can be established. Only differences can exist, if various compositions and ages of the concretes are considered, in the relation speed of the ultrasounds / resistance in compression because the ultrasounds can be influenced by properties of the concretes which do not assign resistance in compression to the same degree.

One studied, in this work, the uncertainties between the velocity of propagation of ultrasonic waves and  $f_c$  introduced by the difference of the compositions. One was also interested to quantify the elastic module by this technique, called dynamic elastic module. Various compositions of concrete were used with variation of the ratios water / cement (E/C) and aggregates (S/S+G)

**Key –words** Non-destructive test, ultrasounds, resistance in compression, concrete, propagation waves, elastic module.

---

# Présentation et objectif de l'étude

---

## **i-Introduction**

Le niveau élevé atteint par la physique vers le milieu du XX<sup>e</sup> siècle s'est manifesté également dans les méthodes d'essai des constructions. Ainsi un vieux désir du constructeur, celui de prévoir la charge qui provoquerait la rupture d'une structure ou d'un élément sans les détruire et même sans les altérer commençait à se matérialiser. Les progrès réalisés ces derniers temps n'ont pas encore permis de remplacer entièrement les méthodes d'essai dites « classiques » ou « destructives », mais les résultats obtenus à l'aide de nouvelles méthodes sont remarquables ; dans de nombreux domaines ils complètent en effet singulièrement les renseignements obtenus par l'essai destructif ; ils présentent quelquefois plus d'intérêt que les données primaires qu'on cherche à déduire et parfois, sont les uniques sources d'information.

Les méthodes d'essai non destructives des ouvrages en béton simple, en béton armé ou en béton précontraint sont particulièrement intéressantes tant par suite de la proportion élevée de ces constructions dans l'ensemble des ouvrages, que par suite de l'importance que présente le contrôle de la qualité directement sur la construction.

Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit :

- essai d'une construction sans la détruire, ni nuire à sa capacité de service ;
- possibilité d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques ( par exemple : observation in situ du durcissement du béton dans l'ouvrage , détection des imperfections in situ dans les ouvrages, détermination et observation dans le temps du degré de corrosion des ouvrages ) ;
- supplément d'informations de caractère local, sous forme de données se rapportant à un grand volume de matériau, donc possibilité d'obtenir un tableau plus complet de l'homogénéité du matériau dans l'ouvrage ;
- économie de matériaux, de temps et d'outillages d'essai, par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais et aussi au fait qu'on peut remplacer certains outillages coûteux et dont la manipulation est délicate par des appareils simples, transportables.

Le principal désavantage des méthodes d'essais non destructives réside dans le fait que dans le stade actuel, elles ne peuvent pas fournir au constructeur des données suffisamment précises pour remplacer totalement les méthodes destructives ou, au moins, dans les principaux domaines d'application. Le rythme auquel elles progressent nous donne cependant la certitude que le moment de leur substitution aux méthodes destructives n'est pas très lointain.[1]

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de cette méthode sont les suivants : les résultats ne sont pas obtenus immédiatement ; le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le compactage peuvent être différents ; et les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme. Bien qu'il ne soit pas possible d'effectuer une mesure directe des propriétés de résistance du béton d'un ouvrage pour la simple raison que la détermination de la résistance entraîne des contraintes destructives, plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point.

Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces

propriétés physiques du béton comprennent la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et la capacité de transmettre les impulsions ultrasoniques et les rayons X et gamma. Les méthodes non destructives peuvent être classées comme suit :essais de résistance à la pénétration ou, à la compression, essais d'arrachement, auscultation dynamique, essais radioactifs et maturation.

## **ii-Objectif**

L'objectif principal de ce travail est de mesurer de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton qui pourra nous renseigner sur :

- \* l'homogénéité du béton
- \* l'estimation du module élastique et de la résistance en compression
- \* l'estimation de la profondeur des fissures

Cette technique est utilisée pour diagnostiquer des structures anciennes (bâtiments, barrages,...) ou même des structures récentes dont le suivi de réalisation a été insatisfaisant ou pour estimer leur caractéristiques pour accélérer le décoffrage.

Généralement la relation entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance peut être établie. Seulement des différences peuvent exister, si on considère différentes compositions et âges des bétons, dans la relation vitesse des ultrasons / résistance en compression car les ultrasons peuvent être influencés par des propriétés des bétons qui n'affectent pas la résistance en compression au même degré.

On propose donc d'étudier les incertitudes, entre la  $v_{pu}$  et  $f_c$ , introduites par la différence des compositions dans une première partie .

On s'intéressera aussi à quantifier le module élastique par cette technique, appelé module élastique dynamique, et à le corrélér au module élastique déterminé par des essais destructifs.

## **iii-Présentation de l'étude**

Ce présent mémoire sera composé de cinq chapitres :

-Le premier chapitre est une étude bibliographique qui consiste en un aperçu global sur le béton et la notion d'excitation et de propagation des sons et des ultrasons.

-Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans l'expérimentation.

-Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes méthodes non destructives utilisées avec une présentation des appareils d'essai.

-L'étude expérimentale est détaillée dans le chapitre quatre avec les résultats obtenus.

-Enfin dans le cinquième chapitre, nous présentons une analyse des résultats obtenus avant de conclure ce travail.

# Chapitre I

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

## I Notions générales

L'ingénieur qui formule un béton, dispose de moyens efficaces pour en assurer la durabilité et la résistance vis-à-vis des environnements habituels. Il est d'ailleurs soutenu dans cette démarche par les normes «Béton», qui spécifient justement les bétons en fonction de ces environnements[2][3].

Formuler un béton résistant, consiste à choisir la qualité et la quantité des constituants en fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage. Alors l'objectif de qualité s'analyse en performances multiples : comportement du béton dans des conditions expérimentales particulières où l'on renforce un mécanisme de dégradation possible.

### 1.1 Béton

béton, matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé de granulats, de sable, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour en modifier les propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics.

#### 1.1.1 Composition

Le dosage des différents constituants du béton dépend du type de matériau recherché, déterminé par ses utilisations. En effet, ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de sa composition et de facteurs extérieurs, tels que la température.

##### a- Ciment

La teneur en ciment dépend de la résistance souhaitée. Pour les bétons de remplissage, peu sollicités, le dosage est de  $150 \text{ kg/m}^3$ . Pour toutes les pièces constituant la structure des bâtiments, en béton armé ou précontraints, le béton contient généralement  $350 \text{ kg/m}^3$  de ciment. Pour les mortiers, mélanges de sable, de ciment et d'eau, la teneur atteint en moyenne  $450 \text{ kg/m}^3$ . Enfin, les coulis, utilisés en injection dans des forages, ne comprennent que du ciment et de l'eau. Ils servent à boucher les microfailles et les fractures d'un terrain, par exemple autour d'un barrage avant son édification.

##### b- Granulats

Les granulats utilisés sont des graviers issus de carrières, blocs de roche concassés et broyés, ou des granulats roulés, extraits du lit des rivières. La taille des granulats varie en fonction de celle du coffrage, de la densité d'acier pour les éléments en béton armé, et du type de béton recherché. La taille des granulats est indiquée par deux chiffres, la plus grande dimension des éléments les plus petits et celle des éléments les plus grands. Par exemple, un gravier 5/15 est composé de particules dont le diamètre varie entre 5 et 15 mm. Pour les bétons employés en bâtiment, les granulats les plus courants sont des graviers 5/15 et 15/25. Pour des travaux de génie civil, où les pièces sont plus massives, les graviers sont plus gros, jusqu'à 150 mm de diamètre dans le cas des barrages. Il s'agit alors de béton cyclopéen.

### c- Sable

Les grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre inférieur à 2 mm. Cette roche sédimentaire doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un béton, le mortier de ciment, contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau. Il sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et pour dresser les enduits sur les murs.

### d- Eau

L'eau doit être propre ; c'est généralement de l'eau potable. Si elle contient des chlorures, une réaction chimique a lieu et modifie la prise du ciment. Le béton perd alors ses qualités de résistance. La consistance du béton, et donc sa facilité de mise en œuvre dans les coffrages, dépend de la quantité d'eau. Plus un béton est liquide, plus il est facile à travailler. Mais un tel matériau présente une plus faible résistance une fois sec. Il est donc nécessaire de définir la teneur en eau selon l'usage du béton, et d'obtenir le juste équilibre pour que le matériau soit résistant et néanmoins maniable. En général, le béton mis en œuvre est plutôt sec, mais il est vibré au coulage pour lui permettre de remplir correctement le coffrage, et pour expulser l'air emprisonné lors du malaxage.

### e- Adjuvants

Lors du malaxage, on ajoute parfois des adjuvants au béton qui permettent de modifier les propriétés du matériau. Il est ainsi possible de rendre des bétons étanches, pour construire des ouvrages souterrains ou des piscines ; on peut retarder ou accélérer le temps de prise du ciment dans le béton. Des adjuvants sont également utilisés à des fins architecturales. Par exemple, au cours du malaxage, on peut ajouter des pigments aux bétons ou aux mortiers. Des durcisseurs de surfaces, des particules de quartz sont incorporés pour obtenir des dalles en béton supportant des charges roulantes importantes, en usine par exemple. Le béton peut être rendu poreux et fortement perméable, pour des applications en lit filtrant, ou sous les chaussées de route, pour empêcher l'eau de pluie de stagner sur les voies de circulation. Pour obtenir des massifs de béton lourd, utilisés comme lest, on peut incorporer des particules d'acier. Le béton obtenu peut avoir une densité allant jusqu'à  $4 \text{ t/m}^3$ , alors que la masse volumique d'un béton courant non armé est de  $2,4 \text{ t/m}^3$ , selon la nature des composants. Le béton comprenant des particules de plomb contribue à stopper les rayonnements ; on l'emploie en milieu nucléaire. Le béton lourd possède également de très bonnes propriétés d'isolation phonique.

## I.2.2 Préparation

### a- Malaxage

On mélange les composants à la main, à la pelle, ou au moyen d'engins mécaniques, tels qu'une bétonnière. Pour des grands travaux, le béton est fabriqué dans une centrale qui mélange automatiquement les constituants selon une composition programmée à l'avance. La production peut atteindre plus de  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'objectif est de mélanger suffisamment les composants pour obtenir une pâte homogène, au sein de laquelle les éléments les plus fins, sable et ciment, comblent les vides laissés par l'agglomération des granulats ; on doit également envelopper complètement les graviers pour obtenir, une fois sec, un matériau reconstituitif d'une roche.

**b- Coulage**

Le béton peut être transporté jusqu'au chantier par des toupies, bétonnières montées sur camion. Une pompe à béton achemine le matériau en hauteur ou sur des sites difficilement accessibles aux camions. Sur les gros chantiers, le pompage du béton permet des cadences beaucoup plus importantes que si l'on emploie des bennes amenées par grue sur le lieu du coulage. Le béton peut également être projeté au moyen de compresseurs pneumatiques. Ce matériau, qui ne nécessite pas de coffrage, est utilisé lors de la construction de piscines, ou pour conforter des talus de terre instables risquant de s'écrouler.

**c- Vibration**

Une fois coulé dans un coffrage, le béton est vibré à l'aide d'aiguilles ou par des vibreurs électriques montés directement sur le coffrage. L'air expulsé durant cette phase provient des cavités entre les graviers, qui se remplissent de la pâte fine de ciment et de sable. La vibration permet un mélange efficace et améliore le durcissement.

**d- Durcissement**

La température ambiante a une grande influence sur le durcissement, ou prise, du béton. Par temps de gel, il peut être nécessaire de chauffer l'eau, parfois même les agrégats, avant de malaxer et de couvrir le matériau pour retenir la chaleur dégagée par les réactions exothermiques lors de la prise du ciment. Par temps très chaud, au contraire, on doit arroser le béton et le garder à l'ombre, afin que l'eau nécessaire à la prise ne s'évapore pas et provoque un retrait, c'est-à-dire une diminution de volume de la pièce. Ce phénomène engendre des fissures dans le béton. Plus le béton est maintenu humide sur une longue période, plus sa résistance sera importante. La prise a lieu en quelques heures.

**e- Décoffrage**

Pour les pièces préfabriquées et les éléments non porteurs, il est possible de décoffrer quelques heures seulement après le coulage. En général, par temps doux, on coule le béton le soir pour le décoffrer le lendemain matin. Les éléments porteurs, comme les poutres ou les planchers, doivent rester plusieurs jours dans leur coffrage : le béton doit durcir suffisamment pour supporter leur propre poids, ainsi que les charges qui y seront appliquées. [4]

## I.2 Critères généraux

Dans des études récentes [2], les chercheurs ont essayé de modéliser ou déterminer des critères généraux, pour évaluer la durabilité du béton, ils ont conclu que plusieurs paramètres influent sur cette durabilité. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- La résistance.
- Le rapport E/C.
- Le dosage en ciment.
- Dosage des granulats.
- Dosage de l'eau et plasticité.
- La porosité

### 1.2.1 Résistance

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu.

D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnement, est un critère de qualité. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables[5].

#### -Relation entre la résistance et l'âge du béton [6]

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} \cdot f_{c28} \quad \text{pour } f_{c28} \leq 40 \text{ Mpa} \quad (1.1)$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1.40+0.95j} \cdot f_{c28} \quad \text{pour } f_{c28} > 40 \text{ Mpa} \quad (1.2)$$

#### -Relation entre la résistance et le module élastique [6]

$$E_s = 11000 \sqrt[3]{f_{cij}} \quad (1.3)$$

$$E_{vj} = 3700 \sqrt[3]{f_{cij}} \quad (1.4)$$

### 1.2.2 Rapport E/C

G.Chanvillard et P.Laplante [7], mentionnent que la résistance est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment. Cette porosité résultant principalement de la valeur du rapport E/C, ainsi la résistance à la compression est directement liée au rapport E/C.

Il faut toutefois être prudent quant au rôle de ce paramètre sur les résistances à court terme, c'est à dire, que la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue [8].

### 1.2.3 Dosage en ciment

Le moyen d'accroître les résistances à court terme d'un béton, peut être d'augmenter son dosage en ciment. En effet, pour augmenter la résistance et diminuer la porosité, cela conduit à diminuer le rapport E/C, c'est à dire augmenter le dosage en ciment. Dans les ouvrages, plus le béton sera dosé en ciment, plus l'exotherme sera importante, ce qui devrait se traduire par des gains de résistance à court terme plus importants ; c'est pour cela que le dosage en ciment est considéré comme une condition de sécurité [7].

Sauf justifications spéciales et accord du maître de l'œuvre, le dosage en ciment doit être compris entre 250Kg et 450Kg/m<sup>3</sup> de béton en œuvre. Pour les ouvrages courants de béton armé, le dosage de ciment est généralement de 350 Kg/m<sup>3</sup>. Pour les ouvrages de béton armé nécessitant des qualités particulières d'étanchéité et de compacité, ainsi que pour les ouvrages de béton précontraint, ce dosage doit être de 400 à 450 Kg/m<sup>3</sup>.

Les dosages minimaux en ciment des ouvrages en béton, sont à choisir suivant les critères de résistance donnés dans les règles de conception et de calcul de ces ouvrages et suivant les critères de durabilité. [9][10].

### 1.2.4 Dosage des granulats

Le dosage des granulats est défini par les proportions en volume ou, de préférence en poids des différents granulats entrant dans la composition d'un mètre cube en œuvre. La détermination de ces proportions doit faire l'objet d'une étude expérimentale particulière, à moins que le constructeur ne dispose, pour des matériaux analogues utilisés dans des conditions identiques, des règles pratiques sûres confirmées par une longue expérience de ces matériaux [13][14].

La proportion relative de sable et de gravier doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante, sans aucun risque de ségrégation [9][12][13].

Nous notons que, la résistance mécanique des granulats, joue un rôle très important sur la durabilité du béton. Plus les granulats seront pleins serrés, plus ils présentent le minimum des vides

### 1.2.5 Dosage de l'eau et plasticité

Le dosage en eau, est fixé pour des granulats supposés secs pour un mètre cube de béton en œuvre. Si les granulats employés contiennent une certaine quantité d'eau, cette quantité doit être évaluée et déduite de l'eau totale prévue ; on obtient ainsi l'eau à ajouter lors du malaxage.

Le dosage en eau doit être suffisant, pour que le béton présente la plasticité compatible avec une bonne ouvrabilité, mais il ne doit pas être excessif car les résistances du béton diminuent quand le dosage en eau augmente. On ne doit jamais, à la sortie du malaxeur, rajouter de l'eau à un béton jugé trop sec [9][14].

---

### I.2.6 Porosité

La porosité du béton est le degré de remplissage de son volume par les pores. Ainsi, c'est aussi le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La porosité d'un matériau peut être caractérisée par [15] :

La densité

Le pourcentage volumique des pores.

La taille moyenne des pores.

La distribution dimensionnelle des pores.

La surface développée des pores.

---

## I.2 Notions d'excitation et de propagation des sons et des ultrasons

### I.2.1 Son

Le son est une sensation auditive due à une vibration acoustique. Chez l'homme, la sensibilité au son, ou audition, correspond aux vibrations qui atteignent l'oreille interne et dont les fréquences sont comprises entre 15 Hz et 20 000 Hz. L'unité de fréquence du son, le hertz (Hz), représente un cycle par seconde. Le terme de son est parfois restreint aux ondes acoustiques qui se propagent dans l'air, mais les médecins actuels en étendent la portée aux vibrations similaires qui se produisent dans les milieux liquides et solides. Les sons de fréquence supérieure à 20 000 Hz sont appelés ultrasons.

D'une manière générale, une onde peut se propager transversalement ou longitudinalement dans un milieu. Dans les deux cas, seule la quantité d'énergie véhiculée par l'onde se déplace, tandis que le milieu demeure pratiquement inchangé. Un exemple simple d'onde transversale se présente lorsqu'on secoue l'extrémité libre d'une corde attachée à un poteau. Une onde va parcourir la corde jusqu'au poteau, avant de se réfléchir et de revenir à son point de départ. Chaque portion de la corde se sera déplacée transversalement et à tour de rôle, de haut en bas et de bas en haut. Ce type de déplacement d'onde s'appelle onde transversale. Un autre exemple d'onde transversale est celui de la pierre qu'on jette dans l'eau. À partir du point d'impact vont se former des séries de vaguelettes. Un bouchon flottant placé près du point d'impact va monter et descendre, perpendiculairement à la direction de la propagation de l'onde. En revanche, le bouchon ne subira pas ou peu de déplacement longitudinal.

Un exemple typique d'onde longitudinale est celui de l'onde acoustique. Les molécules d'air qui constituent le support du son, se déplacent d'avant en arrière, parallèlement à la direction du déplacement de l'onde. On peut par conséquent considérer une onde acoustique comme une suite périodique de compression et de dilatation de l'air. Au passage de l'onde, chaque molécule transmet une certaine quantité d'énergie aux molécules voisines, tout en conservant plus ou moins sa position initiale.

#### I.2.1.1 Vitesse du son

La fréquence d'une onde acoustique correspond à une mesure du nombre d'ondes qui passent par seconde en un point donné. La distance entre deux sommets successifs de cette onde s'appelle la longueur d'onde. Le produit de cette longueur d'onde par la fréquence est égal à la vitesse de propagation de l'onde, qui est la même pour tous les sons se propageant dans le même milieu à température constante.

La vitesse de propagation du son dans l'air sec à une température de 0 °C est de 331,6 m/s. Lorsque la température s'élève, la vitesse du son augmente également. Ainsi, à 20 °C, la vitesse du son est de 344 m/s. En revanche, une modification de la pression dans un milieu de densité constante n'a pratiquement pas d'influence sur la vitesse du son.

Lorsque le son se propage dans un gaz, sa vitesse dépend de la densité de ce gaz. Cela peut se comprendre facilement : si les molécules du gaz sont lourdes, elles se déplacent moins facilement, si bien que le son se propagera plus lentement dans un tel milieu. Par conséquent, plus le gaz est dense, plus la vitesse du son dans ce gaz est faible. Le son se propage donc plus rapidement dans de l'air humide que dans de l'air sec, puisque l'air humide contient un plus grand nombre de molécules légères.

En général, le son se propage plus rapidement dans les liquides et dans les solides que dans les gaz. On montre que la vitesse du son est proportionnelle à la racine carrée du module

d'élasticité du milieu. C'est pourquoi le son se déplace très rapidement dans l'acier qui est très élastique : sa vitesse est de presque 5 km/s. Dans le cas du cuivre, la vitesse du son est de 3 353 m/s à la température ordinaire, mais décroît lorsque la température augmente, parce que l'élasticité du cuivre diminue. En revanche, la vitesse du son dans l'eau, qui est de 1 525 m/s à la température ordinaire, augmente lorsque la température s'élève.

### 1.2.1.2 Réfraction, réflexion et interférence

Le son se propage en ligne droite lorsqu'il traverse un milieu ayant une densité uniforme. Cependant, comme la lumière, le son est sujet à la réfraction dès qu'il pénètre dans un nouveau milieu. La réfraction se traduit par un changement de la direction initiale des ondes. Lorsque le son passe d'un milieu dans un autre, il a tendance à revenir vers celui dans lequel il se propage plus lentement. Dans les régions polaires, par exemple, où l'air situé à hauteur d'homme est plus chaud que celui situé au niveau du sol, une onde acoustique pénétrant dans cette zone plus chaude, sera détournée vers le sol, où sa vitesse de propagation est plus faible. La réfraction des ondes acoustiques explique également la bonne ou mauvaise réception d'un son se propageant dans le vent. En effet, la vitesse du vent est généralement plus faible au niveau du sol qu'à une hauteur de quelques mètres. Par conséquent, une onde acoustique portée par le vent va se réfracter vers le sol, zone dans laquelle l'onde se propage plus lentement. Il sera donc possible pour un être humain de percevoir cette vibration acoustique. En revanche, une onde acoustique se déplaçant contre le vent va se réfracter vers le haut, donc à une hauteur empêchant toute réception possible du son pour un individu.

À l'instar de la lumière, l'onde acoustique peut également subir une réflexion ou une diffraction. La réflexion d'un son correspond au phénomène de l'écho. En acoustique, on utilise beaucoup la réflexion pour amplifier ou pour capter des sons. Par exemple, le mode de fonctionnement du sonar se base sur la réflexion des sons se propageant dans l'eau. Une autre application de la réflexion sonore est le mégaphone, sorte de tube en forme d'entonnoir, qui réfléchit les ondes acoustiques vers l'intérieur, provoquant ainsi la focalisation du son émis. Le conduit auditif de l'oreille fonctionne exactement suivant le dispositif inverse, en focalisant les ondes acoustiques grâce à la partie évasée de l'oreille qui est pointée vers la source sonore. Le son est également soumis aux interférences. Si un son émis par une source emprunte deux chemins différents (un chemin direct et un chemin réfléchi) pour parvenir à une source réceptrice, les deux sons créés vont alors se superposer. S'ils sont en phase, leur combinaison aboutira à un son plus fort. En revanche, s'ils sont en déphasage, le son perçu sera moins puissant que celui obtenu sans interférence. Des sons de fréquences différentes peuvent également interférer : on obtient alors des distorsions complexes.

---

## **I.2.2 Ultrasons**

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20 kHz, correspondant à des sons inaudibles pour l'homme.

### **I.2.2.1 Production et détection**

Les générateurs modernes d'ultrasons peuvent produire des fréquences de plusieurs gigahertz (1 GHz = 1 milliard de Hz), en transformant un courant électrique alternatif en oscillations mécaniques. La détection et la mesure des ondes ultrasonores s'effectuent principalement à l'aide d'un récepteur piézo-électrique ou par des moyens optiques, les ondes ultrasonores pouvant diffracter la lumière.

### **I.2.2.2 Applications**

Les ultrasons ont de nombreuses applications en physique, en chimie, en technologie et en médecine. Les ondes ultrasonores sont utilisées depuis longtemps pour la détection et la communication sous-marines dans les sonars, très employés pour la navigation et, en particulier, pour la guerre sous-marine.

En physique, les ultrasons servent à déterminer certaines propriétés de la matière, telles que la compressibilité, les chaleurs spécifiques et les constantes élastiques. Les ultrasons permettent de réaliser des émulsions, telles que le lait homogénéisé. On les utilise également pour détecter les défauts de certains matériaux. Les ultrasons dont les fréquences sont de l'ordre du Ghz peuvent être utilisés pour obtenir un « microscope acoustique », capable de visualiser des détails inférieurs à 1  $\mu\text{m}$ . Les ondes acoustiques de surface, de fréquence ultrasonique, constituent une partie importante des appareils de contrôle électronique.

En médecine, les ultrasons sont utilisés pour les diagnostics, ou remettre en état des tissus endommagés. La physiothérapie utilise également les ultrasons.[4]

### I.2.3 Production des sons et des ultra-sons

Les moyens servant à produire les sons sont variés et sont connus sous le nom générique de radiateurs acoustiques. Parmi les radiateurs acoustiques, il y a lieu de mentionner : la voix humaine, les instruments musicaux à cordes et à vent, les instruments de percussion, les moteurs de tous genres, générateurs de bruit dans l'industrie ou dans la rue, les véhicules, les machines-outils, les diffuseurs, le mouvement de l'eau ou de l'air, etc.

Les sons et les ultra-sons sont des vibrations élastiques d'un milieu matériel. Ce qui les différencie, c'est la sensation qu'elles produisent sur l'oreille de l'homme. Tandis que les sons dont la fréquence est comprise entre 15 et 20 000 Hz sont perçus par l'oreille, les ultrasons ont des fréquences supérieures à cet intervalle et ne peuvent pas être détectés par l'oreille. La fréquence des ultrasons a pour limite inférieure 20 000 Hz et pour limite supérieure  $10^{10}$  Hz ; au-dessus de celle-ci, ils perdent leurs propriétés spécifiques de propagation ; c'est là le seuil inférieur d'une nouvelle forme de vibrations élastiques, les hyper-sons [16].

Les méthodes acoustiques sont aujourd'hui les méthodes d'essai non destructives les plus répandues. Elles doivent leur large popularité surtout à un rapprochement évident entre les phénomènes qui régissent la propagation des ondes et les propriétés physico-mécaniques du milieu que ces ondes traversent. Il y a cependant dans cette analogie une restriction qui apparaît tout de suite. Tandis que la propagation des ondes est un phénomène dynamique et purement élastique dans le domaine des faibles énergies employées, les propriétés physico-mécaniques des matériaux n'ont pas toutes un caractère exclusivement élastique. Par exemple : le module d'élasticité dynamique ou le coefficient de poisson dynamique garde un caractère purement élastique pour des sollicitations relativement faibles mais, par contre, les résistances mécaniques du matériau à tout type de sollicitation, du fait même de la notion de rupture qu'elles impliquent, renferment certainement, outre les propriétés élastiques, les propriétés visco-plastiques du matériau. La différence entre les conditions de propagation des ondes élastiques dans différents milieux a également créé la possibilité d'appliquer ces catégories de méthodes non destructives pour déterminer les défauts internes des ouvrages ou des éléments de construction.

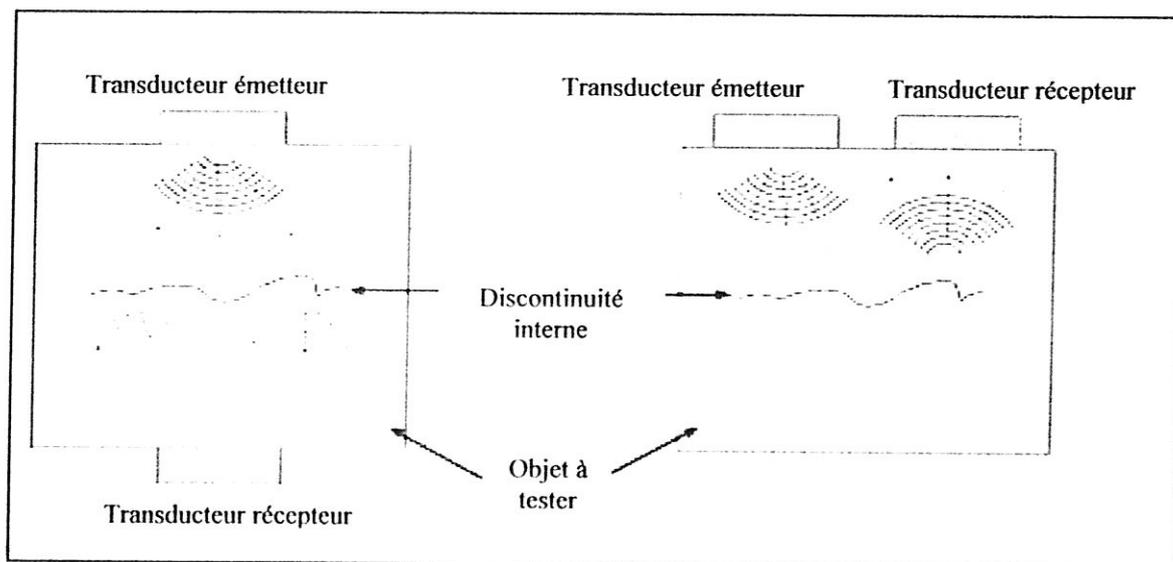


Figure I.2.1 : Evaluation non destructive par ultrasons

### I.2.3.1 Mesure des constantes élasto-dynamiques

les méthodes ultrasoniques à impulsions permettent de déterminer aussi bien le coefficient de Poisson dynamique ( $\mu_d$ ), que le module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ) ou le module d'élasticité transversale dynamique ( $G_d$ ), seules deux de ces trois quantités étant indépendantes, entendu qu'elles sont reliées entre elles, conformément à la théorie de l'élasticité, par la relation :

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu_d)} \quad (1.4)$$

Pour une détermination complète des constantes élastiques, il faut connaître deux des vitesses de propagation des ultrasons, de type différents, formant un rapport qui permet de déterminer le coefficient de Poisson dynamique, si l'on connaît le rapport  $a$  de la vitesse de propagation des ondes transversales à la vitesse de propagation des ondes longitudinales :

$$a = \frac{V_T}{V_L} \quad (1.5)$$

le coefficient de Poisson a pour relation :

$$\mu_d = \frac{1-2a^2}{2-2a^2} \quad (1.6)$$

pour préciser la relation entre les coefficient de Poisson dynamique et statique, il faut spécifier la grandeur de la charge à laquelle on détermine le coefficient de Poisson statique. En admettant entre les deux coefficients une relation de la forme générale :

$$\mu_d = \alpha \mu_{st} \quad (1.7)$$

$\alpha$  a dans le cas du béton, les valeurs moyennes suivantes :

1,00 pour les charges extrêmement faibles ( pratiquement nulles ) ;

1,20 pour les charges d'environ un tiers de la charge de rupture, ce qui est le cas usuel;

0.65 pour les charges au voisinage de la rupture .

La détermination la plus directe du module d'élasticité dynamique se fait à l'aide de la vitesse de propagation des ondes de dilatation. Dans ce but on emploie la relation classique qui résulte de la théorie de la propagation des ondes :

$$E_d = V_d^2 \gamma \quad (1.8)$$

où  $\gamma$  est la masse volumique du matériau.

Mais à cause des dimensions des éprouvettes et de la fréquence des ultrasons employés, les conditions pour la formation des ondes de dilatation, c'est-à-dire :

$$\lambda \leq 0.2 d \quad (1.9)$$

où  $d$  représente la plus grande dimension de l'éprouvette transversale à la direction de propagation, sont rarement remplies, et la relation (1.8) ne peut pas être appliquée. Le cas le plus fréquent dans les corps solides est celui de la mesure de la vitesse des ondes

longitudinales, parce que la condition :

$$\lambda \leq 2 d \quad (1.10)$$

où les notations ont la même signification que dans la relation (1.9), est pratiquement toujours remplie.

Dans ce dernier cas, on modifie la relation (1.8) en y ajoutant un facteur qui dépend de  $\mu_d$  en

accord avec la relation  $V_D = \sqrt{\frac{(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d}} \cdot V_L$ , et la relation (1.8) prend la forme :

$$E_d = V_L^2 \gamma \frac{(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d} \quad (1.11)$$

Voici un tableau des valeurs des constantes élasto-dynamiques de quelques matériaux usuels, que l'on peut rencontrer dans le bâtiment :

Tableau I.2.1 valeurs des constantes élasto-dynamiques de quelques matériaux usuels.

Matériau	$\gamma$ ( Kg/dm <sup>3</sup> )	$\mu_d$	$E_d$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_d$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Aluminium	2.7	0.34	710 000	264 000
Culvre	8.9	0.35	1 250 000	464 000
Fer	7.8	0.28	2 100 000	820 000
Fonte	7.7	0.27	1 170 000	448 000
Nickel	8.8	0.31	2 054 000	785 000
Plomb	11.4	0.44	160 000	58 000
Béton jeune	2.4	0.25-0.30	100 000-200 000	-
Béton de plus de 28 jours	2.35	0.20-0.24	300 000-450 000	-
Plexiglas	1.18	0.35	53 500	15 000
Marbre	2.66	0.30	736 000	282 000
Gneiss	2.65	0.27	700 000	250 000
Porcelaine	2.41	0.23	150 000	60 000
Basalte	2.72	0.30	586 000	238 000
Polystyrène	0.02	0.41	699 000	268 000

### I.2.3.2 Détermination de la résistance du béton

La détermination de la résistance du béton à la traction et surtout à la compression a fait l'objet de longues recherches dans beaucoup de pays, et nous considérons comme un hommage bien mérité de souligner le rôle de pionniers qu'ont eu, grâce à leurs recherches dans ce domaine, R.Jones [17], [6] en Grande-Bretagne et G.Dawance et R.L'Hermite en France. Par la suite, ces travaux ont été repris et continués avec succès par des chercheurs des Pays – Bas [18], de Belgique, de Pologne, de l'U.R.S.S, de Roumanie, de la République Fédérale d'Allemagne, de Hongrie, de Tchécoslovaquie et d'autres pays, de sorte que le niveau atteint dans certains pays a permis de standardiser ces méthodes d'essai.

Aujourd'hui il y a encore une diversité d'opinions en ce qui concerne l'efficacité des méthodes ultra-soniques à impulsions dans la détermination de la résistance du béton ; ce qui est accepté unanimement ou, tout au moins par la majorité des chercheurs dans ce domaine.

Un premier fait reconnu est que la seule mesure de la vitesse de l'ultrason dans le béton, non confirmée par d'autres observations, risque de conduire, dans l'évaluation de la résistance du béton, à de grandes erreurs qui dans certains cas peuvent même dépasser  $\pm 40\%$ .

Un deuxième fait également reconnu est qu'en général plus la vitesse de propagation est grande, plus la résistance du béton à la compression est forte.

Une première voie, a été de procéder à des essais à des âges différents . A coté de l'avantage que présente sa simplicité remarquable, cette méthode présente aussi des inconvénients, à savoir : l'influence qu'exerce l'âge du béton sur la relation entre la vitesse de propagation de l'ultrason et la résistance du béton à la compression .

Les regards se sont aussi portés vers les facteurs qui provoquent réellement la variation de la résistance du béton dans un ouvrage donné. La condition supplémentaire que devaient remplir ces facteurs était qu'ils ne modifient pas la forme de la relation entre la vitesse et la résistance.

Dans ces conditions les recherches faites en Roumanie ont montré qu'on peut choisir comme facteurs de variation simultanée de la résistance du béton et de la vitesse de propagation , soit le degré de compactage du béton , soit le rapport eau/ciment employé dans la préparation du béton , soit les deux facteurs .

La logique de l'équivalence s'explique par le fait que les deux facteurs provoquent une modification de la porosité du béton , à laquelle sont sensibles tant les mesures de vitesse de propagation que les mesures de résistance. Ce choix a rencontré initialement une certaine opposition, telle celle manifestée par certaines délégations à la session du Groupe d'Essai Non Destructifs du RILEM , tenue à Bucarest en 1964 , mais le temps a travaillé en sa faveur , de sorte qu'à la conférence des pays est-européens de 1967 tenue à Bratislava et qui avait pour sujet les méthodes d'essai du béton à l'aide des ultrasons , la méthode a été acceptée comme méthode unique, même par les pays qui s'y étaient opposés en 1964 .Aujourd'hui elle est aussi prévue dans les recommandations RILEM [17] .

Les essais à différents âges pour établir la courbe de transformation vitesse-résistance ne paraissent logiques que dans les cas où l'on veut suivre l'évolution du durcissement d'un béton dans le temps , ce qui est assez peu fréquent.

Il y a lieu de remarquer que le mode de compactage et de changement non contrôlé de l'eau de mélange sont les facteurs qui soumettent le plus souvent les résistances du béton dans l'ouvrage à des variations ne pouvant pas être contrôlées [1].

# Chapitre II

## **DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX**

## II Caractéristiques des matériaux utilisés

Nous allons présenter dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région de Guelma les matériaux utilisés sont :

Deux sables de mer : A est un sable trouvé au niveau du laboratoire de génie civil et d'hydraulique, B est un sable de la région de Skikda.

Le sable concassé de la carrière Bendjerah Guelma (carrière SARL SAPAM).

Deux types de gravier concassés : le gravier 5/15 et le gravier 15/25 de la carrière de SARL SAPAM de la carrière Bendjerah Guelma .

Le ciment de CPJ de Hedjar Essoud ( Skikda ).

Et de l'eau potable du laboratoire LGCH Guelma.

### II.1 Sables

#### II.1.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés

Nous avons utilisé pour la confection du béton, des sables dont les caractéristiques sont déterminés expérimentalement, au laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma , suivant les normes françaises AFNOR [24].

Les résultats d'essais sont exposés dans le tableau suivant :

*Tableau II.1.1 : Caractéristiques physiques des sables de mer utilisés.*

Caractéristiques		Normes		
		A	B	
Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> ) «absolue »		2.54	2.67	NF P 18-555
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		-	1.70	NF P 18-555
Equivalent de sable	E.S.V (%)	98.05	71.42	NF P 18-598
	E.S.P (%)	94.41	67.46	
Teneur en eau (%)		2.45	3.48	NF P 18-555

#### Commentaires

##### a)- Equivalent de sable[29]

D'après les essais sur les sables étudiés, nous avons trouvé que :

Pour le sable A : E.S.V > 80%

E.S.P > 80%.

C'est un bon sable.

Pour le sable B : 65% < E.S.V < 75%.

60% < E.S.P < 70 %.

C'est un sable légèrement argileux, de propriété admissible, pour les bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

### II.1.2 Module de finesse [2]

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm) sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

avec :  $R_c$  : refus cumulé sur tamis de module 23, 26, 32, 35, 38.

$M_f \geq 3.2$  Sable gros

$1.8 \leq M_f < 3.2$  Sable moyen

$M_f < 1.8$  Sable fin

On trouve les résultats de différents sables utilisés qui sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.1.2 : Module de finesse.

Sable	A	B
Module de finesse	4.96	4.93

#### Remarques

- $M_f > 3.2$  : les sables sont alors considérés comme de gros sables.

## II.2 Gravier

### II.2.1 Dénomination des graviers

Tableau II.2.1 : Dénomination des graviers

Dénomination du gravier	Gravier	Origine
Gravier 1	Gravier concassé	BENDJERAH
Gravier 2	Gravier concassé	BENDJERAH

### II.2.2 Caractéristiques physiques des graviers utilisés

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.2.2 : Caractéristiques physiques des graviers utilisés.

Caractéristiques	Normes				
	Gravier 1		Gravier 2		
	5/15	15/25	5/15	15/25	
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.631	2.70	2.72	2.70	NF P18- 554
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.582	-	1.582	-	NF P18-554
Teneur en eau du gravier (%)	0.164	0.1605	0.315	12.05	NF P18-554

### II.2.3 Caractéristiques mécaniques des graviers utilisés

Les graviers utilisés dans l'étude du béton, ont été soumis à deux essais mécaniques en laboratoire.

**- Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) :** NF18-573 octobre 1978[25].

La présente norme est utilisée pour la mesure de la résistance, à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de gravier.

**- Essai de résistance à l'usure (Essai MD) :** NF P18-572 [26].

L'essai consiste à mesurer, la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm, en soumettant le matériau à l'usure de boulets normalisés dans la machine de MICRO- DEVAL (MD).

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

*Tableau II.2.3 : Caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.*

Caractéristiques	Dénomination du gravier
	A
	5/15
Coefficient de Los Angeles	27.00
Coefficient micro-deval « MD »	19.00

#### Commentaires

a)- Selon le mode opératoire défini par la norme NF P18-573, pour le coefficient de Los Angeles, le seuil est fixé à 40%.

Pour les deux types du gravier  $L_A < 40$ , nous pouvons conclure que les deux types du gravier sont utilisables pour le béton hydraulique.

b)- Selon la norme NF P18-572, le seuil est fixé à 35%.

Si «MD » < 35% : ce qui est le cas pour notre gravier. Il en résulte que le gravier est acceptable pour le béton.

### II.2.4 Les caractéristiques chimiques des graviers utilisés

Les résultats de l'analyse chimique du gravier de la SARL SAPAM, nous ont été communiqués par le Laboratoire des Travaux Publics de Guelma.

Ces résultats sont donnés par le tableau (II-2.4)

*Tableau II.2.4 : Analyse chimique du gravier .*

Désignation	% Insolubles	% Carbonates	% Gypses	Observations
Sable de carrière	10.10	88.62	-	Calcaires marneux
5/15	09.10	88.62	-	Calcaires marneux
15/25	10.40	84.80	-	Calcaires marneux

## II.3 Ciment

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe 32.5, qui provient de la cimenterie de Hedjar Essoud (wilaya de SKIKDA).

### II.3.1 Caractéristiques physiques

Les différentes caractéristiques sont regroupés dans le tableau suivant.

*Tableau II.3.1 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé [3].*

Caractéristiques	Ciment
	CPJ
Masse volumique absolue	3.1
Masse volumique apparente	1.12
Surface spécifique	3702

#### Observation

1- Le ciment (CPJ) de classe 32.5 .

## II.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable fournie au laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma.

# Chapitre III

## **PRESENTATION DES METHODES UTILISEES**

---

### III Présentation des méthodes utilisées

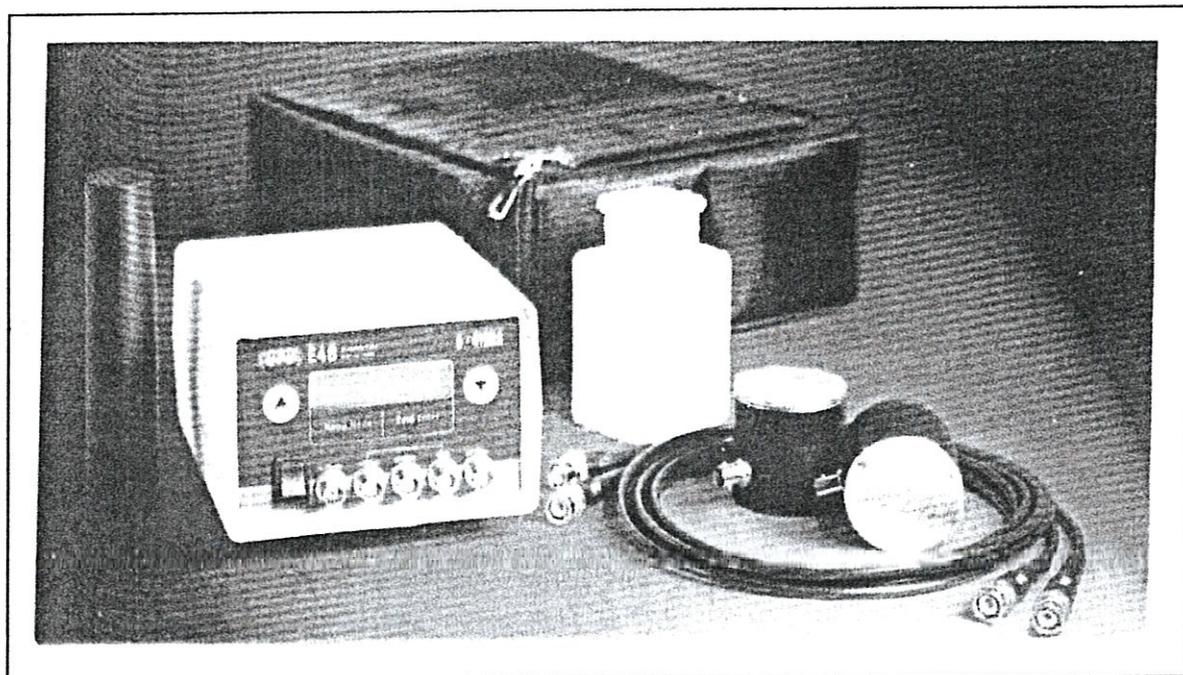
#### III.1 Auscultation dynamique (NF P 18-418) [18]

La méthode qui consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques est actuellement la seule du genre qui permette d'effectuer des essais de résistance sur le béton coulé sur place. Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très semblables. Ces appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur [19] d'impulsions. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel de contact est indispensable.
- Le parcours doit être préférablement d'au moins 30 cm de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.
- La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion .

Applications et limites : La méthode consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions est une méthodes idéale pour déterminer l'homogénéité du béton. Elle peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction. Habituellement, lorsque de grands écarts de la vitesse de propagation de l'impulsion sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré [20].



**Figure III.1.1 : Appareillage ultrasonique utilisé**

### **III.1.1 Principes de base**

L'appareil génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises au béton par transducteurs mis en contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital.

### **III.1.2 Description de l'appareil**

L'appareil utilisé comprend :

- Le testeur ultrasonique 58-E0048
- Une tête de transmission et une de réception (54 kHz)
- Deux câbles de connexion (BNC)
- Un barreau de calibrage
- Un flacon de gel de contact

### **III.1.3 Résultats des essais et évaluation**

#### **a-Positionnement des transducteurs**

Bien que la direction pour laquelle le maximum d'énergie soit par rapport à la face d'émission, il est possible de détecter des impulsions s'étant propagées dans le béton en d'autres directions. Il est possible donc de faire des mesures de vitesses de propagation en plaçant les deux transducteurs en opposition ( transmission directe ), adjacents ( transmission semi-directe ) ou sur le même plan ( transmission indirecte ou de surface ).

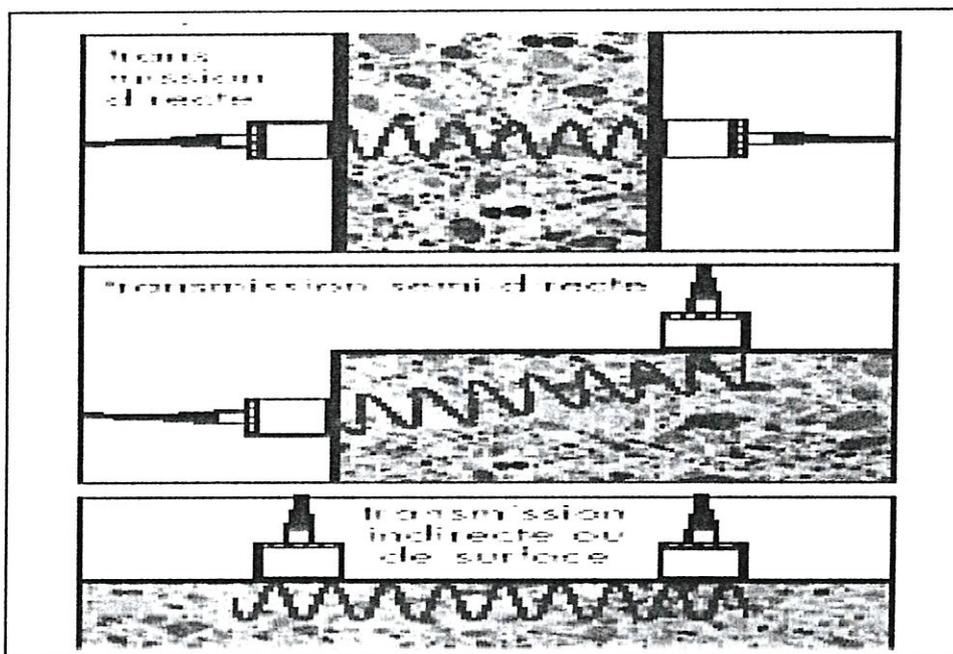


Figure III.1.2 : Types de propagation d'ondes

#### b- Mesure du temps de propagation et de la longueur de parcours

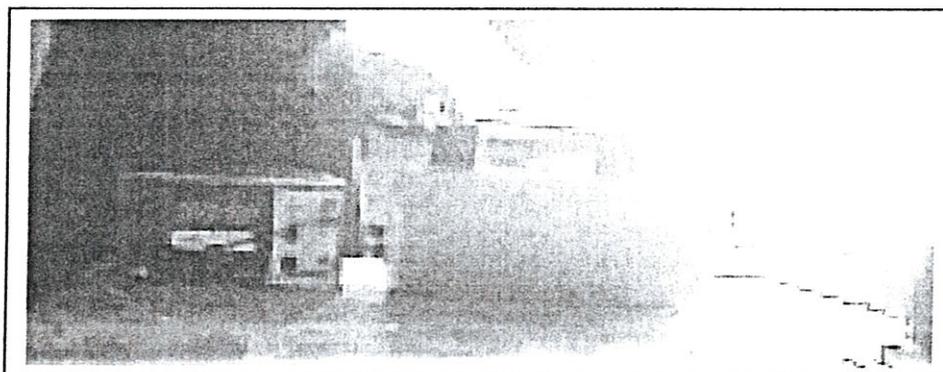


Figure III.1.3 : Mesure du temps de propagation et de la longueur de parcours .

En transmission directe, la longueur de parcours est la distance entre les deux transducteurs et sa mesure devra être effectuée, si possible, à une précision de  $\pm 1\%$ .

En transmission semi-directe, il est généralement suffisant de déterminer la distance de centre à centre des transducteurs. La précision d'estimation de la longueur de parcours dépendra de la dimension des transducteurs comparée à la distance centre à centre.

En transmission directe et semi-directe, la vitesse de propagation sera calculée selon la formule :

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

Où :

V est la vitesse conventionnelle de propagation, en km/s

L est la longueur de parcours, en mm

T est le temps de propagation en ms.

Note : en exprimant L en mètres et T en secondes, la vitesse obtenue sera en mètres/secondes. La détermination de la vitesse de propagation sera arrondie au plus proche 0.01 km/s ou trois chiffres significatifs.

En transmission indirecte ou de surface, il y a une certaine incertitude par rapport à la longueur exacte de la longueur de parcours, liée à la dimension des surfaces de transducteur en contact avec le béton . Il est dès lors souhaitable d'effectuer une série de mesures à différents espacements de transducteurs pour éliminer cette incertitude .

Pour cela , le transducteur émetteur sera placé en contact avec la surface du béton en un point P fixe et le transducteur récepteur sera déplacé en différents points alignés à des distances fixes . Les temps de propagation relevés seront reportés sur une courbe donnant la relation temps/distance entre transducteurs . Un exemple est montré en figure III.1.4.

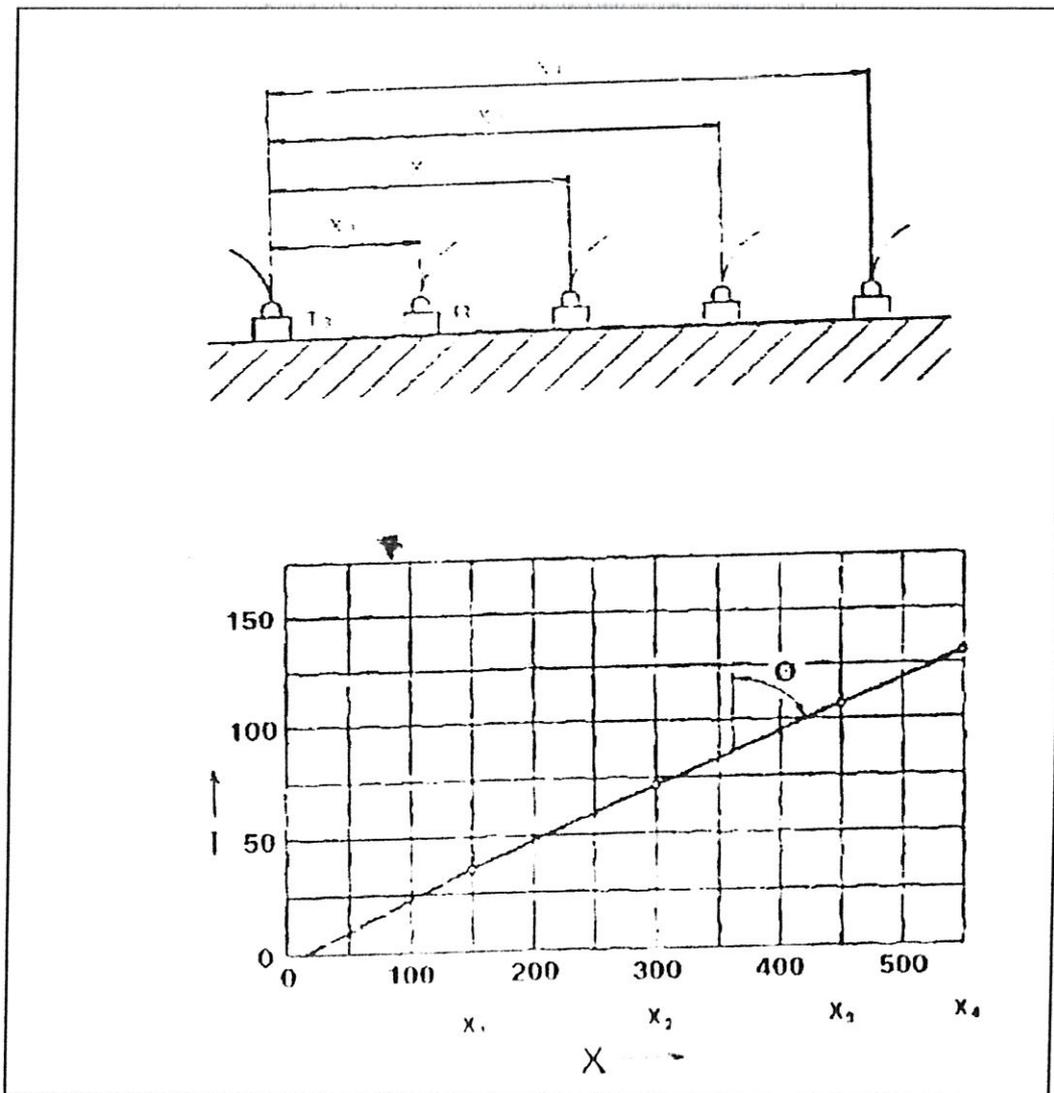


Figure III.1. 4 : Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface .

La pente de la meilleure droite traçable passant par les points sera mesurée et relevée comme vitesse conventionnelle de propagation sur la ligne de mesure. Si une discontinuité apparaît

dans la courbe, il est probable qu'une fissure ou une zone de moindre qualité de béton soit présente et la vitesse mesurée n'est dès lors pas significative.

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions est décrite au tableau III.1.1 [21]

*Tableau III.1.1 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions*

Qualité	Vitesse de propagation des impulsions m/s
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660-4575
Douteuse	3050-3660
Mauvaise	2135-3050
Très mauvaise	inférieure à 2135

Il est possible d'obtenir une assez bonne corrélation entre la résistance d'une éprouvette cubique à la compression et la vitesse de diffusion d'une impulsion. Ces relations permettent d'évaluer la résistance du béton d'un ouvrage avec une marge d'erreur de  $\pm 20\%$  pourvu que la composition du béton et les types de granulats ne varient pas.

La méthode consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions a été utilisée pour étudier les effets sur le béton du gel et dégel ; des attaques par les sulfates et les eaux acidifiées. Généralement, la réduction de la vitesse de propagation des impulsions est subordonnée à l'importance des dommages. Les fissures peuvent aussi être détectées.

Cette méthode peut aussi être utilisée pour évaluer le degré de durcissement et de développement de la résistance du béton au début de la prise, et permet donc de déterminer le moment où les coffrages peuvent être enlevés. Des ouvertures doivent être pratiquées dans le coffrage pour que le transducteur soit en contact direct avec la surface du béton. Lors du vieillissement du béton, le taux d'accélération des impulsions diminue beaucoup plus rapidement que le taux de croissance de la résistance, de sorte que lorsque le béton possède une résistance supérieure à 13.6-20.4 Mpa, il est possible de déterminer la résistance avec un degré de précision inférieur à  $\pm 20\%$ . La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage [20].

### **c- Evaluation de l'homogénéité et de l'uniformité du béton**

En traçant un quadrillage sur l'élément béton et en mesurant les temps de propagation correspondants, il est possible d'évaluer l'homogénéité du béton. Il est souhaitable de se servir d'un diagramme pour visualiser les résultats d'essais et démontrer les variations éventuelles de la qualité du béton.

#### **d- Présence de fissures , vides , zones dégradées**

Lorsqu'une onde ultrasonique rencontre un interface béton air, il y a une diffraction et une réflexion qui atténue la vitesse et allonge donc le temps de propagation. En utilisant ce phénomène, il est possible de localiser les défauts, vides, zones dégradées et fissures.

#### **e- Corrélation entre vitesse de propagation et résistance du béton**

Il est à noter que les caractéristiques physiques d'un matériau qui influencent la vitesse de propagation sont le module élastique et la densité. Pour du béton, ces caractéristiques sont relatives au type de granulats, leur proportion dans le mélange, leurs propriétés physiques, celles du ciment liées principalement au dosage eau/ciment que par le type de granulats et les proportions granulats/pâte de ciment. Cela dit, les corrélations entre vitesse de propagation et résistance du béton sont indirectes et devront être établies pour un mélange spécifique. Pour un béton non connu, l'estimation de la résistance, en se fiant seulement à la vitesse de propagation, n'est pas significative.

#### **f- Estimation du temps de propagation**

Si les moules sont équipés de petites trappes de visite, il est possible de contrôler le processus de durcissement de la structure .

#### **g- Estimation du module élastique**

A partir des mesures de vitesse de propagation, il est possible de calculer le module dynamique  $E_D$  selon la formule :

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2.2)$$

Où :

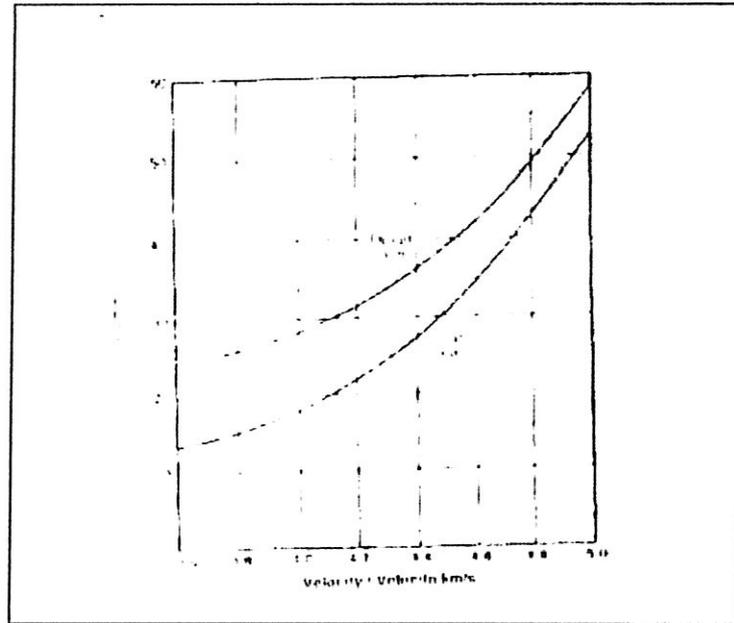
$V$  = vitesse en km/s

$\gamma$  = masse volumique du béton en  $\text{kg/m}^3$

$\nu$  = coefficient de Poisson (pour béton haute résistance  $\nu=0.15$  ; pour béton faible résistance  $\nu=0.30$  )

$E_d$  = Module élastique dynamique en Mpa .

A partir d'un diagramme similaire à la figure III.1.5, il est possible de corréler le module élastique dynamique au module élastique statique et ceci en connaissant la vitesse de propagation des ondes.



**Figure III.1.5 :** Estimation des modules élastiques statiques et dynamiques à partir de la vitesse de propagation .

#### h- Relation vitesse du son-résistance [22]

d'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse du son. Mais il n'existe pas de relation unique valable pour tous les bétons. Comme pour le scléromètre, un certain fuseau de dispersion est constaté et la corrélation est surtout bonne pour les bétons de faible résistance. Pour les hautes résistances, la vitesse du son ne croit pratiquement plus au-delà de 350 bars environ car elle est principalement fonction de la compacité du béton ; étant donné béton de résistance supérieure à 350 bars est pratiquement toujours un béton compact, ceci explique cela. C'est d'ailleurs une des raisons qui font que l'on a encore besoin des essais destructifs sur éprouvettes.

Bon nombre de bétons aujourd'hui, en particulier pour les ouvrages d'art, ont en effet des résistances assez élevées ; dans ce cas, il est bien difficile de savoir si la résistance est de 400 ou de 500 bars.

Par contre, les bétons poreux, gelés, etc., sont assez facilement détectés par la vitesse du son. La vitesse du son est fonction également de la nature des granulats employés. Mais c'est à nouveau une question de compacité et les granulats poreux, les granulats légers en particulier, procurent pour une même résistance à la compression, une vitesse plus faible. Il est donc nécessaire, quand cela est possible, d'établir au préalable un étalonnage avec les granulats et le dosage en ciment qui seront utilisés pour l'ouvrage considéré.

Nous citons cependant deux relations parmi toutes celles proposées :

$$R = 16.7 \exp . \frac{E_d}{122500} \quad (2.3)$$

$E_d$  est le module d'élasticité dynamique qui est fonction de la vitesse du son d'après la relation :

---

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

$\gamma$  = masse volumique du béton en  $\text{kg/m}^3$

En résumé, les essais d'auscultation dynamique sont très efficaces pour contrôler la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures ou les imperfections. Ces essais ne sont pas toutefois aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions. Parmi ces variables, on s'intéressera dans notre travail à la variation du rapport eau/ciment et à la proportion des granulats sable/(sable+gravier).

Il existe d'autres moyens pour le contrôle de la qualité du béton qui relèvent de la dureté de surface afin d'estimer la résistance à la compression, il s'agit bien de l'auscultation au scléromètre.

## III.2 Essai Sclérométrique (NF P 18-417) [18]

L'utilisation d'essais sclérométriques sur les matériaux de construction, en particulier sur le béton, date de plusieurs décennies. Le scléromètre est le plus connu des appareils pour un contrôle rapide du béton. Appliqué sur une face de la partie à ausculter par une pression de la main, il permet à une petite masse mobile de rebondir plus ou moins en fonction de la dureté superficielle du béton. Il existe une relation assez nette entre la dureté superficielle et la résistance du béton.

### III.2.1 Principe de base

Le scléromètre, permet non seulement d'effectuer des essais de manière traditionnelle mais également le traitement automatique des résultats d'essais pour obtenir une estimation de la résistance à la compression du béton examiné par corrélation avec des courbes établies par contrôles ou avec celles de l'utilisateur obtenues par voie expérimentale.

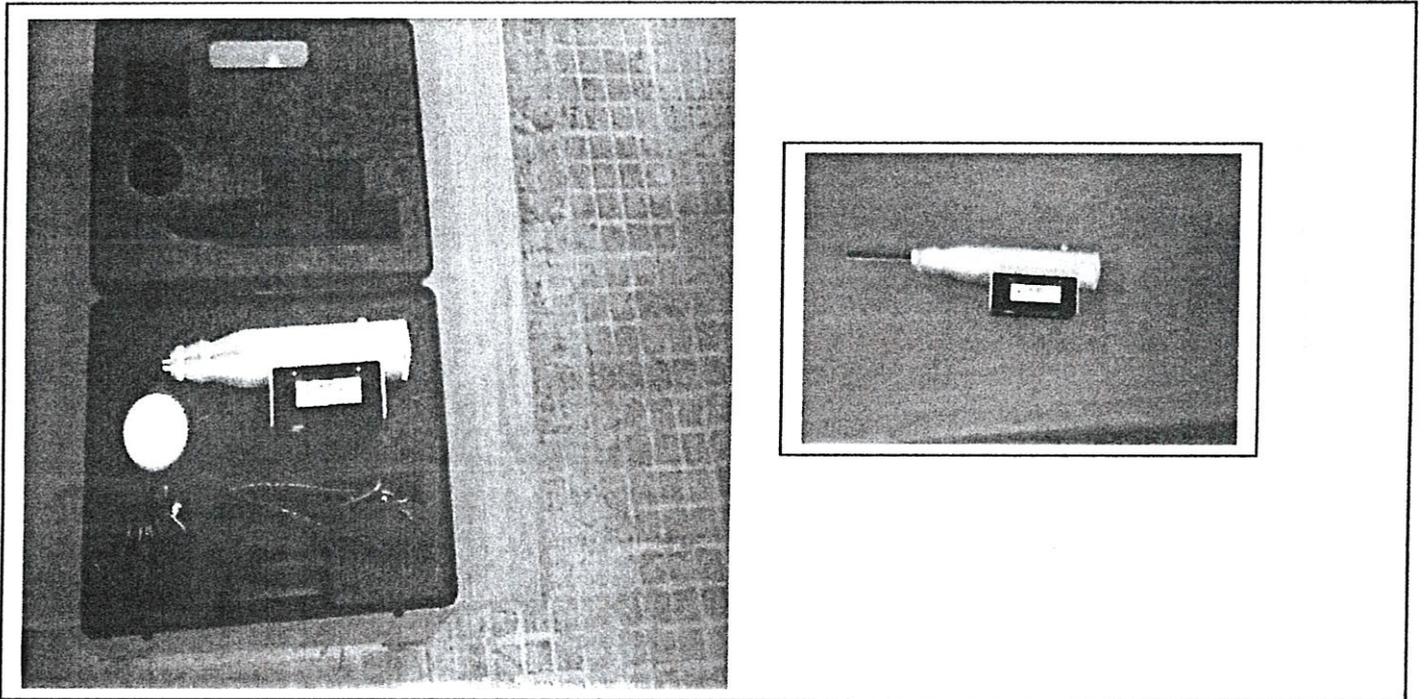


Figure III.2.1 : Appareillage sclérométrique utilisé .

### III.2.2 Utilisation du scléromètre

L'appareil est un scléromètre électronique digital fonctionnant sur batterie.

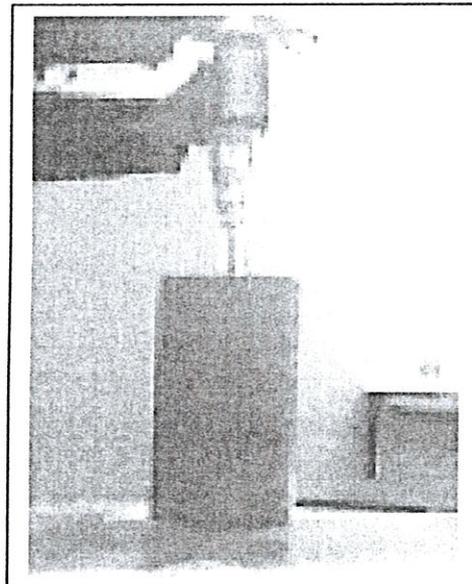
1- Lorsque le scléromètre est dans son coffret de rangement, la tige de percussion se trouve bloquée dans le corps du scléromètre. Pour la faire sortir, il faut appuyer la tige de percussion sur une surface dure afin qu'elle se libère.

2- Préparer la surface à tester en enlevant, si nécessaire, l'enduit appliqué, avec la pierre abrasive fournie avec le scléromètre.

3- Appliquer la tige perpendiculairement à la surface et appuyer le scléromètre d'une manière continue et uniforme contre la surface jusqu'à ce que la masselotte percute .

4- Après l'impact, la masselotte rebondit en entraînant un curseur de référence . Plus le béton est dur, plus le curseur avancera. Lors de l'appui sur le bouton de blocage le curseur est maintenu dans sa position maximale et le capteur électronique relève sa position pour la transformer en valeur digitale.

5- Pour effectuer un autre essai, il faut répéter les mêmes opérations.



**Figure III.2.2:** Utilisation du scléromètre

### III.3 Essai destructif (essai de compression)

L'essai lui même doit être conduit rigoureusement pour obtenir de bon résultats. On observera en particulier :

- Un bon centrage de l'éprouvette ;
- Une vitesse de chargement donnée ;
- La transcription immédiate du résultats et de tout renseignement utile [22].

#### III.3.1 Présentation de la presse utilisée (essai de compression) (NF P 18-406)

Les éprouvettes sont placées entre les plateaux d'une presse. Elles sont placées de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur, et la charge appliquée doit croître ( une vitesse de montée en charge constante de 0.5 Mpa par seconde  $\pm$  0.2 Mpa par seconde ) [22], jusqu'à la rupture et on mentionne le résultat d'essai d'écrasement selon la norme NF P.18-406 [23].

On considère, bien que l'état des contraintes dans l'éprouvette soit assez complexe, que la rupture se fait en compression simple. La contrainte  $\sigma$  pour expression :

$$f_c = \frac{P_{\max}}{S} \quad (2.4)$$

avec  $S = 200 \text{ cm}^2$  pour une éprouvette 16 x 32 [30 ].

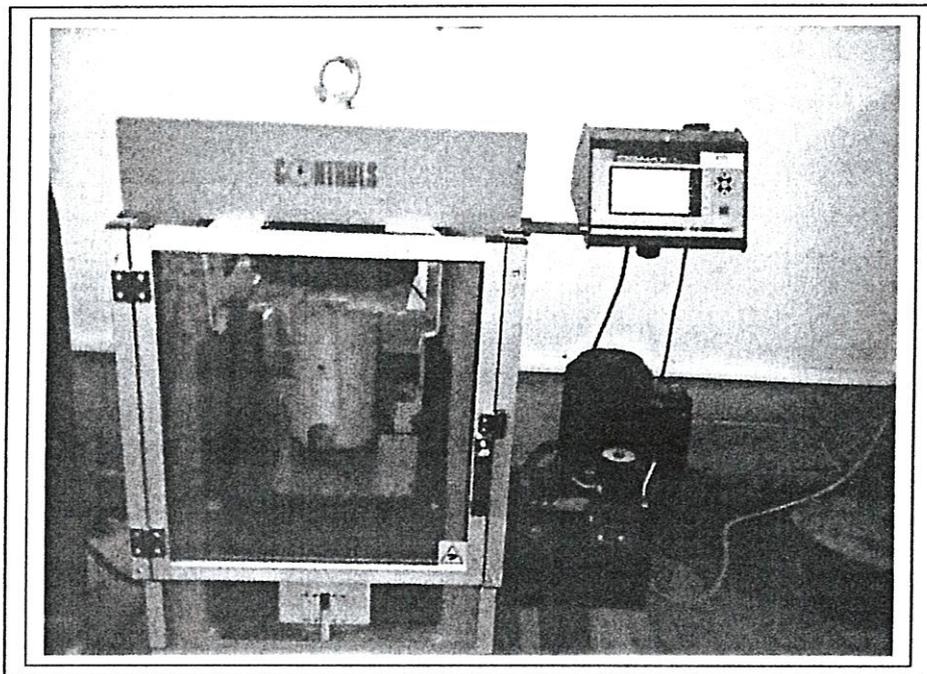


Figure III.3.1 : La presse de compression utilisée.

#### NOTE

Avant l'exécution de l'essai, on doit s'assurer de la planéité de surface de contact supérieure ainsi que de l'orthogonalité du cylindre. On a déposé entre les plateaux et les faces des éprouvettes du carton. Ceci dans le but de diminuer l'effet du frottement.

# Chapitre IV

## **ETUDE EXPERIMENTALE**

---

## IV Etude expérimentale

Cette partie consiste à présenter d'une façon globale les expériences effectuées concernant :

- La composition du béton.
- La confection des éprouvettes.
- La description des essais expérimentaux effectués.

### IV.1 Formulation des bétons

La formulation des bétons revient , d'une certaine façon, à la caractérisation des constituants du béton à fin d'éclairer leur choix car les performances du béton sont en relation avec le choix et les proportions de ces constituants.

#### IV.1.1 Méthodes de composition des bétons

La recherche de la granulométrie optimum d'un béton est fondamentale, car c'est elle qui conditionne toutes les qualités du béton : ouvrabilité, résistance, imperméabilité, etc.

Les méthodes de composition sont nombreuses. On distingue celles qui utilisent des courbes de références et celles basées sur d'autres principes[23].

#### IV.1.2 Méthodes des courbes de références

Nous citons les méthodes suivantes :

- Méthode de Fuller-Thompson
- Méthode de Bolomey
- Etude théorique de Caquot
- Méthode de Faury
- Méthode de Joisel
- Méthode d'Abrams
- Méthode de Vallette
- Méthode de Dreux –Gorisse.

Dans notre travail le choix a été fait sur la méthode de Dreux – Gorisse [27].

## IV.2 Les essais

### IV.2.1 Analyses granulométriques

On s'est proposé de réaliser 09 compositions à savoir les compositions B1, B2 et B3 sont des compositions de références, tirées de la littérature. Les compositions B4 à B9 sont déterminées par les analyses granulométriques.

#### Analyse granulométrique N°B4

La courbe granulométrique est déterminée par tamisage suivant la norme NF P 18- 304 [27].

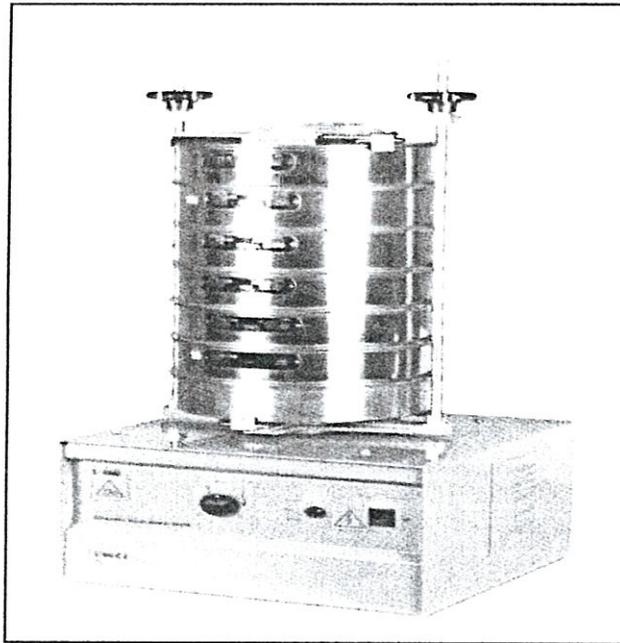


Figure IV.2.1 : La tamiseuse utilisée .

#### Essai sur le sable de mer :

On a effectué deux essais pour chaque granulats.

Tableaux IV.2.1 Analyse granulométrique B4 du sable de mer

#### Essai N° 1 : $P_1=2038.95$ g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.46	0.27	0.013
600 $\mu$ m	532.85	543.83	10.98	0.553
425 $\mu$ m	527.52	1023.12	495.60	24.85
300 $\mu$ m	462.83	1535.83	1073.00	77.47
212 $\mu$ m	459.49	825.05	365.56	95.40
150 $\mu$ m	435.72	512.40	76.68	99.16
75 $\mu$ m	275.26	281.48	6.22	99.46
63 $\mu$ m	422.96	423.54	0.58	99.49
Fond	245.81	247.13	1.32	99.55

**Essai N° 2 :**P<sub>1</sub>=2008.54 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.53	0.34	0.017
600 µm	532.85	542.53	9.68	0.50
425 µm	527.52	973.62	446.1	22.71
300 µm	462.83	1578.00	1115.17	78.23
212 µm	459.49	814.98	355.49	95.93
150 µm	435.72	499.02	63.3	99.08
75 µm	275.26	281.60	6.34	99.39
63 µm	422.96	423.47	0.51	99.41
Fond	245.81	246.99	1.18	99.47

**Essai sur le Gravier 5/15 :***Tableaux IV.2.1 Analyse granulométrique B4 du gravier 5/15***Essai N° 1 :**P<sub>1</sub>=5001.32 g.

Maille	Poids (g)	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	451.68	3092.24	2640.56	49.19
14 mm	436.00	2476.08	2040.08	89.98
10 mm	459.93	618.19	158.26	93.14
8 mm	444.13	540.57	96.44	95.06
6.30 mm	432.28	481.93	49.65	96.05
5.00 mm	429.26	437.24	7.98	96.20
2 mm	410.71	411.80	1.09	96.22
Fond	245.81	249.44	3.63	96.29

**Essai N° 2 :**P<sub>1</sub>=5001.60 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	451.68	2450.34	1998.66	39.96
14 mm	436.00	2591.49	2155.49	83.05
10 mm	459.93	909.48	449.55	92.03
8 mm	444.13	728.75	284.62	97.72
6.30 mm	432.28	512.96	80.68	99.33
5.00 mm	429.26	447.05	17.79	99.68
2 mm	410.71	413.24	2.53	99.73
Fond	245.81	256.00	10.19	99.93

**Essai sur le Gravier 15/25 :***Tableaux IV.2.1 Analyse granulométrique B4 du gravier 15/25***Essai N° 1 :** $P_1=5007.45$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
37.5 mm	442.41	-	-	-
28 mm	434.73	2442.08	2007.35	40.08
20 mm	451.68	2585.53	2133.85	82.69
14 mm	436.04	1155.50	719.46	97.05
10 mm	459.94	567.90	107.96	99.20
Fond	245.42	282.87	37.45	99.94

**Essai N° 2 :** $P_1=5000.64$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
37.5 mm	442.41	-	-	-
28 mm	434.73	2234.59	1799.86	35.99
20 mm	451.68	2568.88	2117.20	78.32
14 mm	436.04	1223.50	787.46	93.79
10 mm	459.94	614.30	154.36	96.87
Fond	245.42	386.35	140.93	99.68

### IV.2.2 Essai d'humidité :

On a effectué des essais d'humidité afin de déterminer la quantité d'eau comprise dans les granulats. Ceci dans le but d'en tenir compte dans la quantité d'eau nécessaire à nos bétons.

#### Equipement :

- Une balance de 5 kg
- Un four

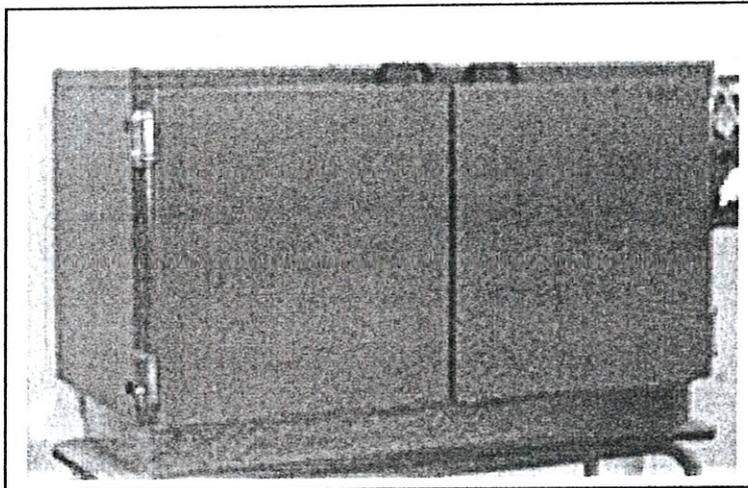


Figure IV.2.2 : Le four utilisé

#### Préparation de l'échantillon :

Le poids de l'échantillon est déterminé selon le tableau ci-dessous .

Tableau IV.2.4 Détermination du poids de l'échantillon en fonction de la grosseur des graviers

Grosseur minimale des grains (en mm )	Poids ( en kg )
à 10	0.5 au moins
à 20	1 au moins
à 40	1.5 au moins
à 70	5 au moins

#### Mode opératoire :

Remplir le vase avec les gravillons, peser et sécher jusqu'au poids constant. L'humidité est obtenue, à 0.1 % près, par la formule suivante :

$$W = [(g' - g) / g] \times 100 \%$$

Où :

$g'$  : poids en état humide ( en grammes ).

$g$  : poids en état sec ( en grammes ).

La valeur adoptée sera la moyenne arithmétique résultant de deux prises d'échantillon différentes. [23].

*Tableau IV.2.5 Essai d'humidité*

<b>Poids Granulats</b>	<b>Avant séchage (g)</b>	<b>1ère pesée (g)</b>	<b>2ème pesée (g)</b>	<b>3ème pesée (g)</b>
Gravier 5/15 (1)	2008.70	2006.43	2005.84	2005.46
Gravier 5/15 (2)	2008.42	2006.00	2005.49	2005.05
Gravier 15/25 (1)	2010.06	2007.79	207.40	2007.16
Gravier 15/25 (2)	2010.71	2008.27	2007.38	2007.14
Sable de mer (1)	2005.28	1964.64	1964.09	1964.02
Sable de mer (2)	2005.02	1948.40	1947.93	1947.55

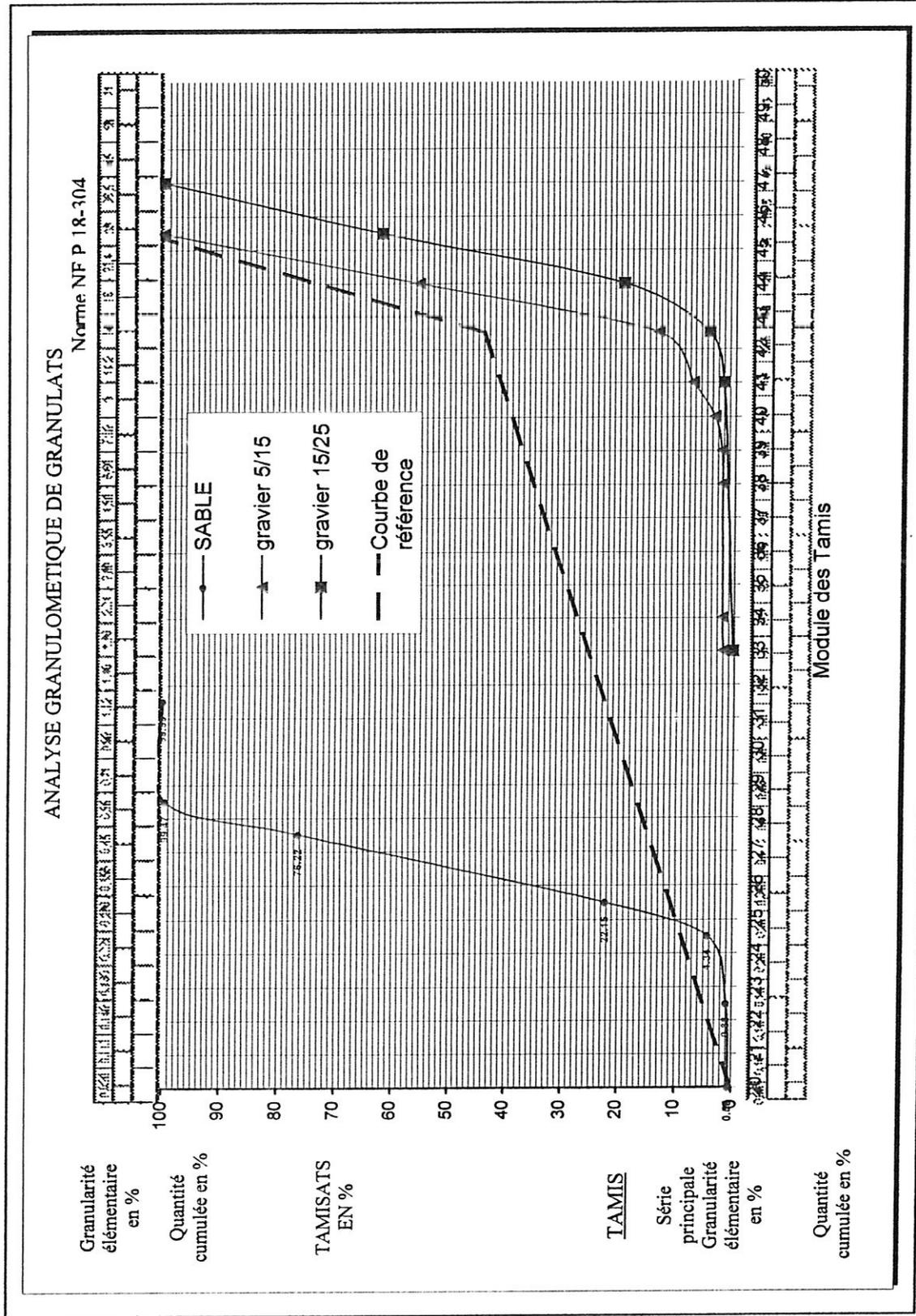
**Pourcentage en eau :**

Gravier 5/15 = 0.164 %

Gravier 15/25 = 0.1605

Sable de mer = 2.45 %

Figure IV.2.3 Analyse granulométrique B4



La composition déduite à partir du graphe est la suivante :

36 % sable de mer  
49% gravier 5/15  
15 % gravier 15/25

pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$  et un affaissement de  $A = 10 \text{ cm}$  le dosage en eau sera

$$C/E = 1.65 \Rightarrow E = 350/1.65 \Rightarrow E = 212.12 \text{ litres}$$

Le volume absolu du ciment :

$$350/3.1 = 112.90 \text{ l}$$

$$\text{La compacité } \gamma = \frac{1000 - E}{1000} = 0.787$$

$$\text{Le volume total absolu} = \gamma \times 1000 = 787.88 \text{ l}$$

$$\text{Le volume absolu des granulats} = 788 - 112.90 = 675.1 \text{ l}$$

$$\text{Le volume absolu du sable de mer} = 0.36 \times 675.1 = 243.036 \text{ l}$$

$$\text{Le volume absolu du gravier 5/15} = 0.49 \times 675.1 = 330.79 \text{ l}$$

$$\text{Le volume absolu du gravier 15/25} = 0.15 \times 675.1 = 101.26 \text{ l}$$

$$\text{le total} = 675.1 \text{ l (vérifié)}$$

Les densités sont : sable = 2.54 ; Gravier = 2.72 ( mesurée)

Les dosages en matériaux secs : (kg)

$$\text{Sable : } 2.54 \times 243.036 = 617.31 \text{ kg}$$

$$\text{Gravier 5/15 : } 2.72 \times 330.79 = 899.74 \text{ kg}$$

$$\text{Gravier 15/25 : } 2.72 \times 101.26 = 275.42 \text{ kg}$$

$$\text{Ciment} = 350 \text{ kg}$$

$$E = 212.12 \text{ kg}$$

$$\text{la densité} = 2354 \text{ kg/m}^3$$

Cette composition a donnée les rapports suivants :

$$S/S+G = 0.34 \quad (\text{rapport sable / granulats})$$

$$E/C = 0.56 \quad (\text{rapport eau / ciment})$$

---

**Analyse granulométrique N°B5**
**Essai sur le sable de mer :***Tableaux IV.2.6 Analyse granulométrique B5 du sable de mer***Essai N° 1 :** $P_1=2038.95$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.46	0.27	0.013
600 $\mu\text{m}$	532.85	543.83	10.98	0.553
425 $\mu\text{m}$	527.52	1023.12	495.60	24.85
300 $\mu\text{m}$	462.83	1535.83	1073.00	77.47
212 $\mu\text{m}$	459.49	825.05	365.56	95.40
150 $\mu\text{m}$	435.72	512.40	76.68	99.16
75 $\mu\text{m}$	275.26	281.48	6.22	99.46
63 $\mu\text{m}$	422.96	423.54	0.58	99.49
Fond	245.81	247.13	1.32	99.55

**Essai N° 2 :** $P_1=2008.54$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.53	0.34	0.017
600 $\mu\text{m}$	532.85	542.53	9.68	0.50
425 $\mu\text{m}$	527.52	973.62	446.1	22.71
300 $\mu\text{m}$	462.83	1578.00	1115.17	78.23
212 $\mu\text{m}$	459.49	814.98	355.49	95.93
150 $\mu\text{m}$	435.72	499.02	63.3	99.08
75 $\mu\text{m}$	275.26	281.60	6.34	99.39
63 $\mu\text{m}$	422.96	423.47	0.51	99.41
Fond	245.81	246.99	1.18	99.47

**Essai sur le Gravier 5/15 :***Tableaux IV.2.7 Analyse granulométrique B5 du gravier 5/15* $P_1=5025.72$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	450.59	921.64	471.05	9.37
14 mm	436.02	2774.07	2338.05	55.89
11.20 mm	447.67	1053.59	605.92	67.94
10 mm	459.94	830.98	371.04	75.32
8 mm	444.15	1152.57	708.12	89.40
6.30 mm	432.29	762.49	330.20	95.97
5.00 mm	429.27	557.01	127.74	98.51
2 mm	410.66	457.33	46.67	99.43
Fond	245.79	272.59	26.80	99.96

**Essai sur le Gravier 15/25 :***Tableaux IV.2.8 Analyse granulométrique B5 du gravier 15/25* $P_1=5007.45$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
37.5 mm	442.39	-	-	-
28 mm	434.70	2432.83	1998.13	39.80
20 mm	450.59	2649.84	2199.25	83.61
14 mm	436.02	1219.07	783.05	99.20
11.20 mm	447.67	481.00	33.33	99.86
10 mm	459.94	461.33	1.39	99.88
Fond	245.79	250.16	4.37	99.96

**Essai d'humidité**

$$W = [(g' - g) / g] \times 100 \%$$

Tableau IV.2.9 Essai d'humidité B5

<b>Poids Granulats</b>	<b>Avant séchage (g)</b>	<b>1ère pesée (g)</b>	<b>2 ème pesée (g)</b>	<b>3 ème pesée (g)</b>
Gravier 5/15 (1)	2163.38	2160.12	2157.14	2157.13
Gravier 5/15 (2)	2153.24	2150.10	2147.00	2146.99
Gravier 15/25 (1)	2194.29	2192.15	2191.89	2191.88
Gravier 15/25 (2)	2187.15	2185.32	2184.76	2184.74
Sable de mer (1)	2061.41	1978.80	1968.07	1968.05
Sable de mer (2)	2054.32	1970.58	1961.48	1961.46

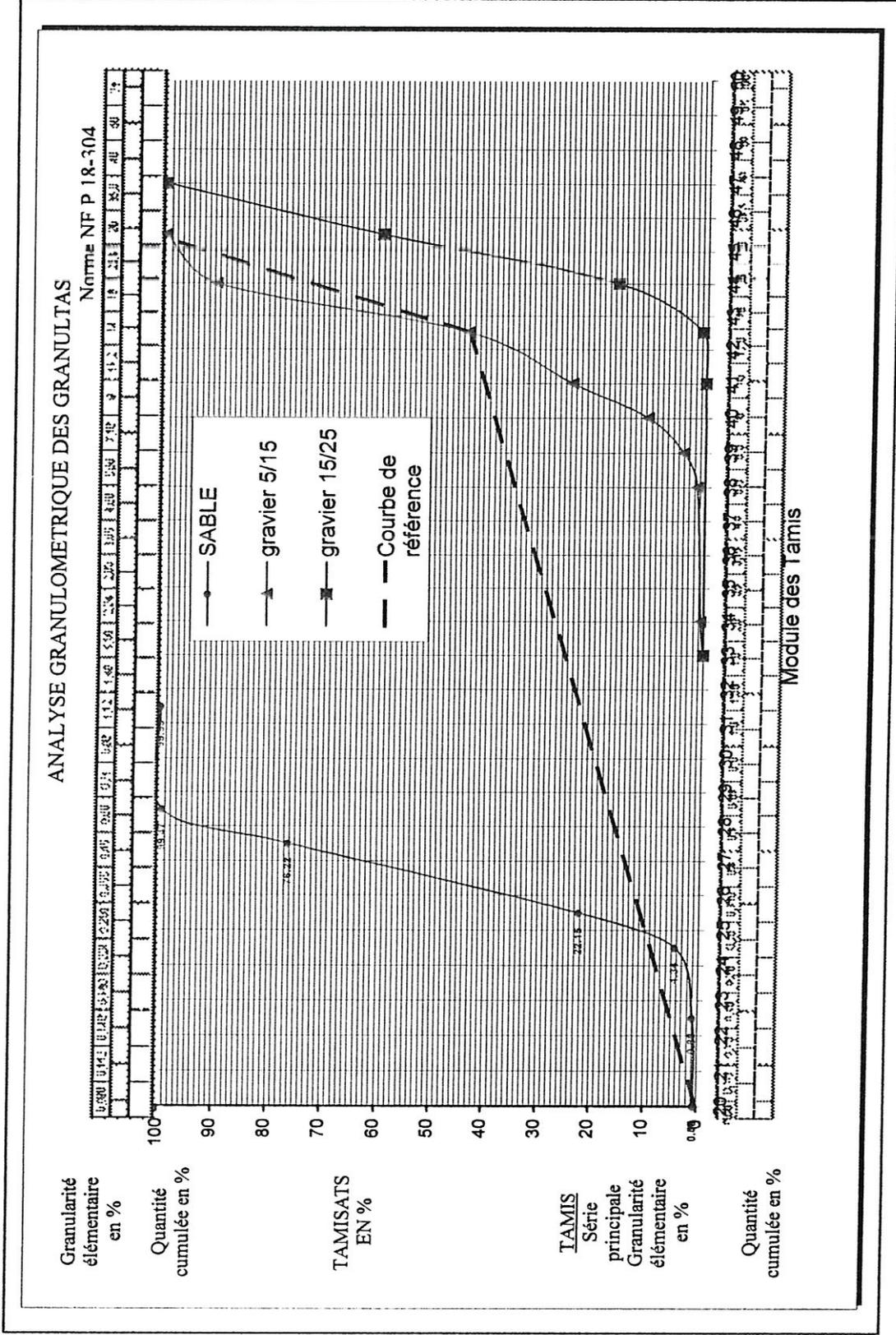
**Pourcentage en eau :**

Gravier 5/15 = 0.28 %

Gravier 15/25 = 0.11 %

Sable de mer = 4.52 %

Figure IV.2.4 Analyse granulométrique B5



---

La composition déduite à partir du graphe est la suivante :

31.5 % sable de mer  
54.45 % gravier 5/15  
14.05 % gravier 15/25

pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$  et un affaissement de  $A = 6 \text{ cm}$

Les dosages en matériaux secs : (kg)

Sable :  $2.54 \times 217.50 = 552.45 \text{ kg}$

Gravier 5/15 :  $2.72 \times 375.97 = 1022.63 \text{ kg}$

Gravier 15/25 :  $2.72 \times 97.01 = 263.86 \text{ kg}$

Ciment =  $350 \text{ kg}$

F =  $196.62 \text{ kg}$

---

la densité =  $2385 \text{ kg/m}^3$

Cette composition a donnée les rapports suivants :

**S/S+G = 0.30** ( rapport sable / granulats )

**E/C = 0.56** ( rapport eau / ciment )

## Analyse granulométrique N°B6

### Essai sur le sable de mer :

*Tableaux IV.2.10 Analyse granulométrique B6 du sable de mer*

#### Essai N° 1 :

$P_1=2038.95$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.46	0.27	0.013
600 $\mu\text{m}$	532.85	543.83	10.98	0.553
425 $\mu\text{m}$	527.52	1023.12	495.60	24.85
300 $\mu\text{m}$	462.83	1535.83	1073.00	77.47
212 $\mu\text{m}$	459.49	825.05	365.56	95.40
150 $\mu\text{m}$	435.72	512.40	76.68	99.16
75 $\mu\text{m}$	275.26	281.48	6.22	99.46
63 $\mu\text{m}$	422.96	423.54	0.58	99.49
Fond	245.81	247.13	1.32	99.55

#### Essai N° 2 :

$P_1=2008.54$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.53	0.34	0.017
600 $\mu\text{m}$	532.85	542.53	9.68	0.50
425 $\mu\text{m}$	527.52	973.62	446.1	22.71
300 $\mu\text{m}$	462.83	1578.00	1115.17	78.23
212 $\mu\text{m}$	459.49	814.98	355.49	95.93
150 $\mu\text{m}$	435.72	499.02	63.3	99.08
75 $\mu\text{m}$	275.26	281.60	6.34	99.39
63 $\mu\text{m}$	422.96	423.47	0.51	99.41
Fond	245.81	246.99	1.18	99.47

**Essai sur le Gravier 5/15 :***Tableaux IV.2.11 Analyse granulométrique B6 du gravier 5/15***Essai N° 1 :**P<sub>1</sub>=5001.32 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	451.68	3092.24	2640.56	49.19
14 mm	436.00	2476.08	2040.08	89.98
10 mm	459.93	618.19	158.26	93.14
8 mm	444.13	540.57	96.44	95.06
6.30 mm	432.28	481.93	49.65	96.05
5.00 mm	429.26	437.24	7.98	96.20
2 mm	410.71	411.80	1.09	96.22
Fond	245.81	249.44	3.63	96.29

**Essai N° 2 :**P<sub>1</sub>=5001.60 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	451.68	2450.34	1998.66	39.96
14 mm	436.00	2591.49	2155.49	83.05
10 mm	459.93	909.48	449.55	92.03
8 mm	444.13	728.75	284.62	97.72
6.30 mm	432.28	512.96	80.68	99.33
5.00 mm	429.26	447.05	17.79	99.68
2 mm	410.71	413.24	2.53	99.73
Fond	245.81	256.00	10.19	99.93

**Essai sur le Gravier 15/25 :***Tableaux IV.2.12 Analyse granulométrique B6 du gravier 15/25***Essai N° 1 :** $P_1=5007.45$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
37.5 mm	442.41	-	-	-
28 mm	434.73	2442.08	2007.35	40.08
20 mm	451.68	2585.53	2133.85	82.69
14 mm	436.04	1155.50	719.46	97.05
10 mm	459.94	567.90	107.96	99.70
Fond	245.42	282.87	37.45	99.94

**Essai N° 2 :** $P_1=5000.64$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
37.5 mm	442.41	-	-	-
28 mm	434.73	2234.59	1799.86	35.99
20 mm	451.68	2568.88	2117.20	78.32
14 mm	436.04	1223.50	787.46	93.79
10 mm	459.94	614.30	154.36	96.87
Fond	245.42	386.35	140.93	99.68

**Essai d'humidité :***Tableau IV.2.13 Essai d'humidité B6*

<b>Poids Granulats</b>	<b>Avant séchage (g)</b>	<b>1ère pesée (g)</b>	<b>2 ème pesée (g)</b>	<b>3 ème pesée (g)</b>
Gravier 5/15 (1)	2008.70	2006.43	2005.84	2005.46
Gravier 5/15 (2)	2008.42	2006.00	2005.49	2005.05
Gravier 15/25 (1)	2010.06	2007.79	207.40	2007.16
Gravier 15/25 (2)	2010.71	2008.27	2007.38	2007.14
Sable de mer (1)	2005.28	1964.64	1964.09	1964.02
Sable de mer (?)	2005.02	1948.40	1947.93	1947.55

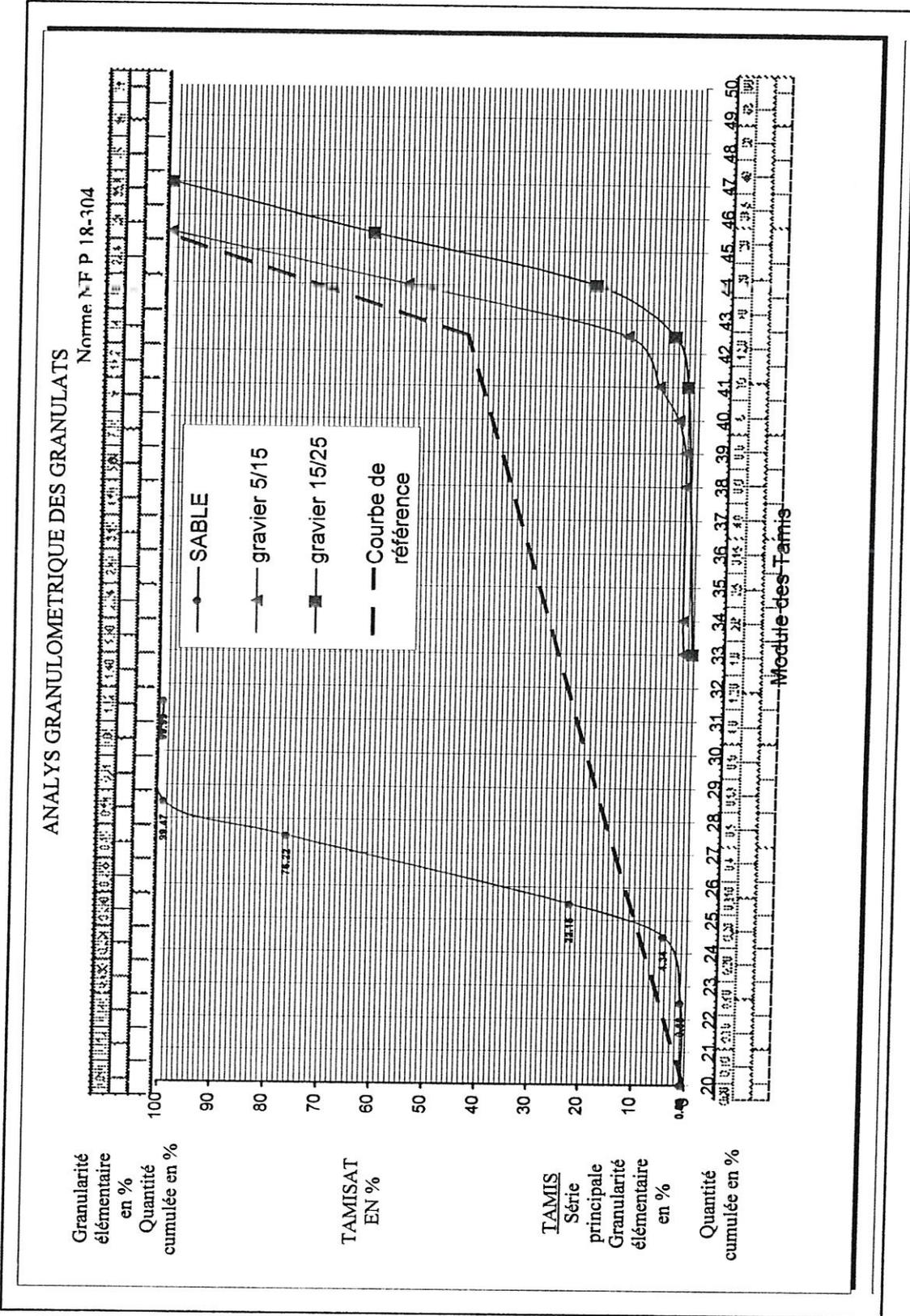
**Pourcentage en eau :**

Gravier 5/15 = 0.164 %

Gravier 15/25 = 0.1605 %

Sable de mer = 2.45 %

Figure IV.2.5 Analyse granulométrique B6



---

La composition déduite à partir du graphe est la suivante :

36 % sable de mer  
49% gravier 5/15  
15 % gravier 15/25

pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$  et un affaissement de  $A = 14 \text{ cm}$

Les dosages en matériaux secs : (kg)

Sable : = 539.39 kg

Gravier 5/15 : = 524.57 kg

Gravier 15/25 = 508.70 kg

Ciment = 350 kg

E = 221.51 kg

---

la densité =  $2144 \text{ kg/m}^3$

Cette composition a donnée les rapports suivants :

$S/S+G = 0.34$  (rapport sable / granulats )

$E/C = 0.63$  ( rapport eau / ciment )

---

**Analyse granulométrique N°B7**
**Essai sur le sable de mer :***Tableaux IV.2.14 Analyse granulométrique B7 du sable de mer***Essai N° 1 :**P<sub>1</sub>=2038.95 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.46	0.27	0.013
600 µm	532.85	543.83	10.98	0.553
425 µm	527.52	1073.17	495.60	24.85
300 µm	462.83	1535.83	1073.00	77.47
212 µm	459.49	825.05	365.56	95.40
150 µm	435.72	512.40	76.68	99.16
75 µm	275.26	281.48	6.22	99.46
63 µm	422.96	423.54	0.58	99.49
Fond	245.81	247.13	1.32	99.55

**Essai N° 2 :**P<sub>1</sub>=2008.54 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.19	578.53	0.34	0.017
600 µm	532.85	542.53	9.68	0.50
425 µm	527.52	973.62	446.1	22.71
300 µm	462.83	1578.00	1115.17	78.23
212 µm	459.49	814.98	355.49	95.93
150 µm	435.72	499.02	63.3	99.08
75 µm	275.26	281.60	6.34	99.39
63 µm	422.96	423.47	0.51	99.41
Fond	245.81	246.99	1.18	99.47

**Essai sur le Gravier 5/15 :***Tableaux IV.2.15 Analyse granulométrique B7 du gravier 5/15***Essai N° 1 :** $P_1=5001.04$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	450.55	450.57	0.02	0
14 mm	436.02	1354.13	918.11	18.36
11.20 mm	447.68	2515.51	2067.83	59.71
10 mm	459.97	1190.55	730.58	74.32
8 mm	444.18	1413.19	969.01	93.69
6.30 mm	432.32	668.61	236.29	98.41
5.00 mm	429.28	463.12	33.84	99.08
3.35 mm	439.31	444.83	5.52	99.19
2 mm	410.67	412.53	1.86	99.22
Fond	245.82	273.32	27.5	99.76

**Essai N° 2 :** $P_1=5000.21$ g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	450.55	450.55	0	0
14 mm	436.02	1521.53	1085.51	21.71
11.20 mm	447.68	2580.48	2132.8	64.36
10 mm	459.97	1159.34	699.37	78.34
8 mm	444.18	1258.57	814.39	94.63
6.30 mm	432.32	636.84	204.52	98.72
5.00 mm	429.28	457.51	28.23	99.28
3.35 mm	439.31	443.21	3.9	99.36
2 mm	410.67	413.34	2.67	99.41
Fond	245.82	273.63	27.81	99.96

**Essai sur le Gravier 15/25 :***Tableaux IV.2.16 Analyse granulométrique B7 du gravier 15/25***Essai N° 1 :** $P_1=5005.29$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
28 mm	434.73	434.73	0	0
20 mm	450.54	940.21	489.67	9.78
14 mm	436.05	4559.41	4123.36	92.16
10 mm	447.66	790.53	342.87	99.01
8 mm	456.94	479.26	22.32	99.39
6.30 mm	444.16	454.86	10.7	99.60
5.00 mm	432.29	434.08	1.79	99.63
2 mm	429.25	429.81	0.56	99.64
Fond	245.78	262.72	16.94	99.98

**Essai N° 2 :** $P_1=5008.22$  g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
28 mm	434.73	434.73	0	0
20 mm	450.54	1301.15	850.61	16.98
14 mm	436.05	4338.58	3902.53	94.90
10 mm	447.66	652.94	205.28	99.00
8 mm	456.94	468.01	11.07	9.16
6.30 mm	444.16	461.45	17.29	99.50
5.00 mm	432.29	433.44	1.15	99.52
2 mm	429.25	429.57	0.32	99.53
Fond	245.78	262.46	16.68	99.86

**Essai d'humidité :***Tableau IV.2.17 Essai d'humidité B7*

<b>Poids Granulats</b>	<b>Avant séchage (g)</b>	<b>Le poids après séchage (g)</b>	<b>L'humidité %</b>	<b>La moyenne %</b>
Gravier 5/15 (1)	1081.61	1077.87	0.34	0.315
Gravier 5/15 (2)	1081.42	1078.22	0.28	
Gravier 15/25 (1)	1200.71	1058.44	11.84	12.05
Gravier 15/25 (2)	1201.02	1053.71	12.26	
Sable de mer (1)	2061.41	1968.05	4.52	4.52

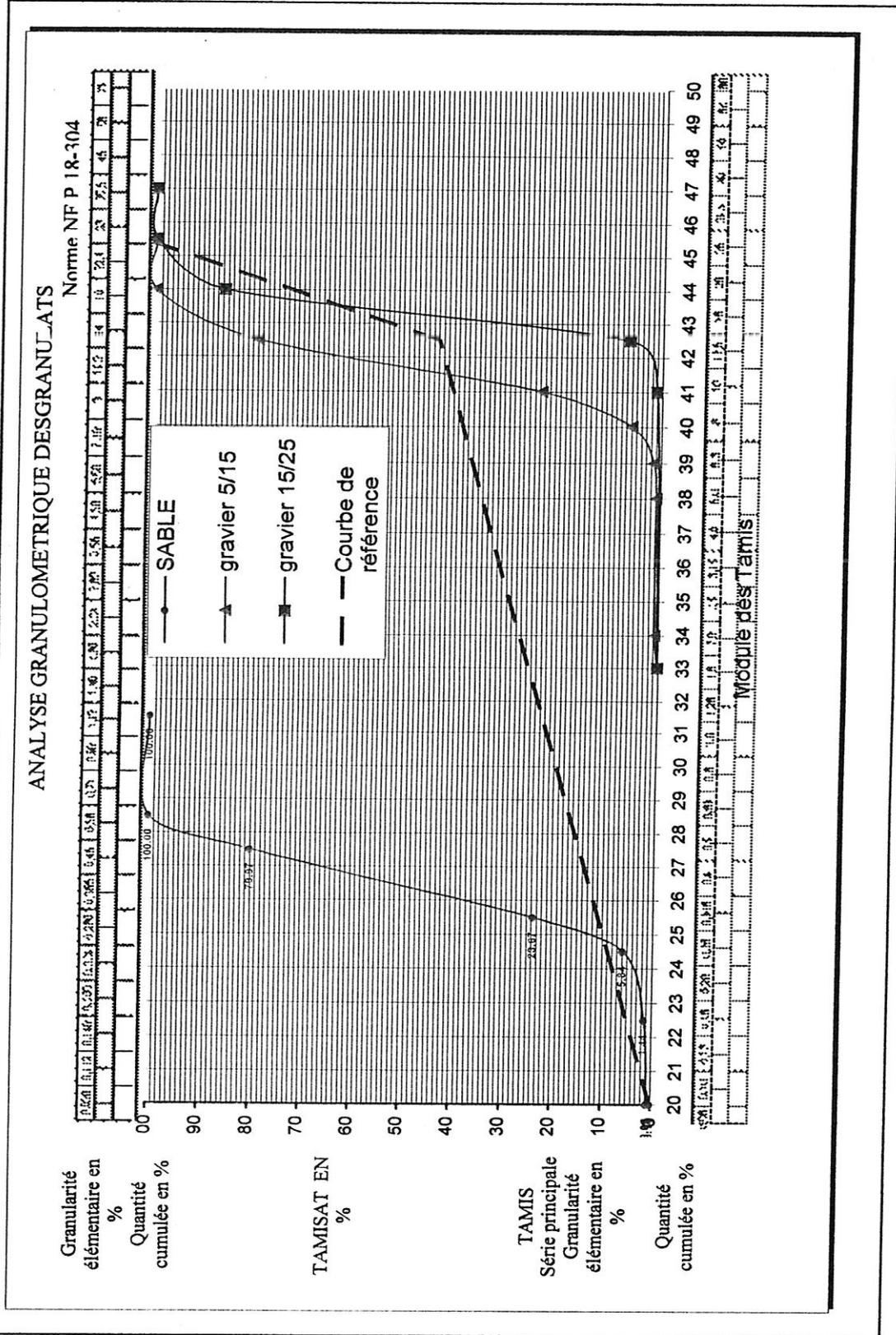
**Pourcentage en eau :**

Gravier 5/15 = 0.315 %

Gravier 15/25 = 12.05 %

Sable de mer = 4.52 %

Figure IV.2.6 Analyse granulométrique B7



---

La composition déduite à partir du graphe est la suivante :

35 % sable de mer  
44.2% gravier 5/15  
20.8% gravier 15/25

pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$  et un affaissement de  $A = 5 \text{ cm}$

Les dosages en matériaux secs : (kg)

Sable = 613.82 kg

Gravier 5/15 = 628.89 kg

Gravier 15/25 = 609.82 kg

Ciment = 350 kg

E = 196.63 kg

la densité =  $2399 \text{ kg/m}^3$

Cette composition a donnée les rapports suivants :

$S/S+G = 0.33$  (rapport sable / granulats )

$E/C = 0.56$  ( rapport eau / ciment )

### Analyse granulométrique N°B8

#### Essai sur le sable de mer :

*Tableaux IV.2.18 Analyse granulométrique B8 du sable de mer*

#### Essai N° 1 :

P= 2000.37 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
1.18 mm	578.13	579.72	1.59	0.07
600 µm	532.81	572.07	39.26	2.04
425 µm	527.51	740.38	212.87	12.68
300 µm	462.82	1834.69	1371.87	81.26
212 µm	459.47	785.95	326.48	97.58
150 µm	435.77	476.92	41.15	99.63
75 µm	275.27	281.45	6.18	99.94
63 µm	422.99	423.10	0.11	99.95
Fond	245.78	246.10	0.32	99.96

#### Essai sur le Gravier 5/15 :

*Tableaux IV.2.19 Analyse granulométrique B8 du gravier 5/15*

#### Essai N° 1 :

P<sub>1</sub>=5001.04 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	450.55	450.57	0.02	0
14 mm	436.02	1354.13	918.11	18.36
11.20 mm	447.68	2515.51	2067.83	59.71
10 mm	459.97	1190.55	730.58	74.32
8 mm	444.18	1413.19	969.01	93.69
6.30 mm	432.32	668.61	236.29	98.41
5.00 mm	429.28	463.12	33.84	99.08
3.35 mm	439.31	444.83	5.52	99.19
2 mm	410.67	412.53	1.86	99.22
Fond	245.82	273.32	27.5	99.76

**Essai N° 2 :**P<sub>1</sub>=5000.21g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
20 mm	450.55	450.55	0	0
14 mm	436.02	1521.53	1085.51	21.71
11.20 mm	447.68	2580.48	2132.8	64.36
10 mm	459.97	1159.34	699.37	78.34
8 mm	444.18	1258.57	814.39	94.63
6.30 mm	432.32	636.84	204.52	98.72
5.00 mm	429.28	457.51	28.23	99.28
3.35 mm	439.31	443.21	3.9	99.36
2 mm	410.67	413.34	2.67	99.41
Fond	245.82	273.63	27.81	99.96

**Essai sur le Gravier 15/25 :***Tableaux IV.2.20 Analyse granulométrique B8 du gravier 15/25***Essai N° 1 :**P<sub>1</sub>=5005.29 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
28 mm	434.73	434.73	0	0
20 mm	450.54	940.21	489.67	9.78
14 mm	436.05	4559.41	4123.36	92.16
10 mm	447.66	790.53	342.87	99.01
8 mm	456.94	479.26	22.32	99.39
6.30 mm	444.16	454.86	10.7	99.60
5.00 mm	432.29	434.08	1.79	99.63
2 mm	429.25	429.81	0.56	99.64
Fond	245.78	262.72	16.94	99.98

**Essai N° 2 :**P<sub>1</sub>=5008.22 g.

Maille	Poids (g) tamis	Poids après vibration (g)	Refus (g)	%
28 mm	434.73	434.73	0	0
20 mm	450.54	1301.15	850.61	16.98
14 mm	436.05	4338.58	3902.53	94.90
10 mm	447.66	652.94	205.28	99.00
8 mm	456.94	468.01	11.07	9.16
6.30 mm	444.16	461.45	17.29	99.50
5.00 mm	432.29	433.44	1.15	99.52
2 mm	429.25	429.57	0.32	99.53
Fond	245.78	262.46	16.68	99.86

**Essai d'humidité :***Tableau IV.2.21 Essai d'humidité B8*

<b>Poids Granulats</b>	<b>Avant séchage (g)</b>	<b>Le poids après séchage (g)</b>	<b>L'humidité %</b>	<b>La moyenne %</b>
Gravier 5/15 (1)	1081.61	1077.87	0.34	0.315
Gravier 5/15 (2)	1081.42	1078.22	0.28	
Gravier 15/25 (1)	1200.71	1058.44	11.84	12.05
Gravier 15/25 (2)	1201.02	1053.71	12.26	
Sable de mer (1)	2000.05	1932.70	3.48	3.48

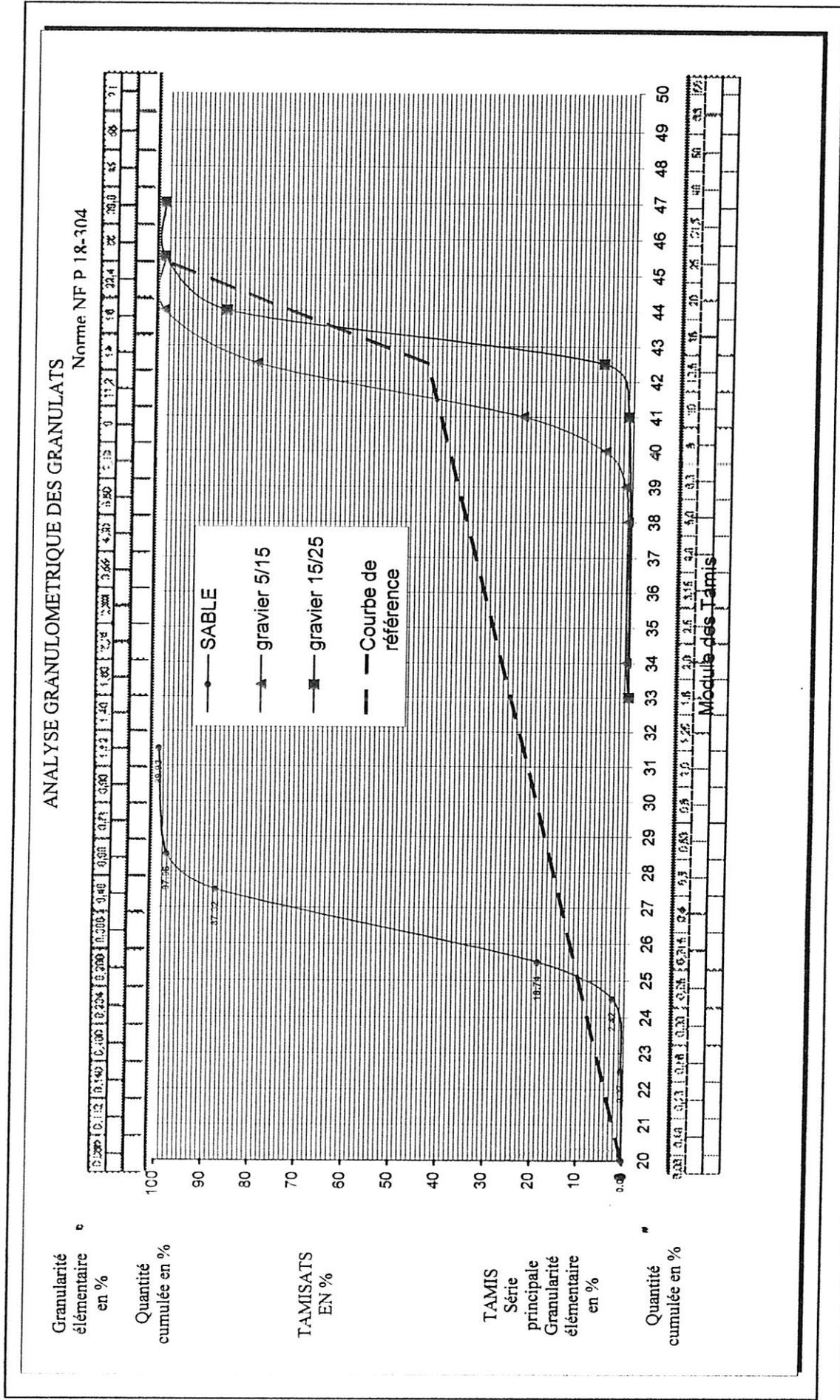
**Pourcentage en eau :**

Gravier 5/15 = 0.315 %

Gravier 15/25 = 12.05 %

Sable de mer = 3.48 %

Figure IV.2.7 Analyse granulométrique B8



---

La composition déduite à partir du graphe est la suivante :

35 % sable de mer  
44.2% gravier 5/15  
20.8% gravier 15/25

pour un dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$  et un affaissement de  $A = 8 \text{ cm}$

Les dosages en matériaux secs : (kg)

Sable = 750 kg

Gravier 5/15 = 700 kg

Gravier 15/25 = 350 kg

Ciment = 350 kg

E = 205.81 kg

la densité =  $2355 \text{ kg/m}^3$

Cette composition a donnée les rapports suivants :

$S/S+G = 0.41$  (rapport sable / granulats )

$E/C = 0.58$  ( rapport eau / ciment )

Le tableau suivant résumera l'ensemble des compositions testées ( 09 compositions )

## IV.2.3 Les compositions du béton

Tableau IV.2.22 : compositions des différents bétons

<b>Composition</b>									
<b>Matériaux [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B9</b>
<b>Sable</b>	500	750	1000	617.31	552.45	539.39	613.82	750	750
<b>Gravier 5/ 15</b>	928	613	520	899.74	1022.63	524.57	628.89	700	700
<b>Gravier 15/25</b>	232	307	130	275.42	263.86	508.70	609.82	350	350
<b>Ciment</b>	440	440	440	350	350	350	350	350	350
<b>Eau</b>	220	220	220	212.12	196.62	221.51	196.63	205.81	205.81
<b>S/S+G</b>	0.30	0.45	0.60	0.34	0.30	0.34	0.33	0.41	0.41
<b>E/C</b>	0.50	0.50	0.50	0.56	0.56	0.63	0.56	0.58	0.58

On remarque bien sur ce tableau la variation des différents paramètres, qu'on s'est projeté de faire varier dans cette étude. Ces paramètres sont bien sûr les rapports E/C et S/S+G.

### IV.3 Confection des éprouvettes

Pour la préparation des éprouvettes, nous avons procédé de la façon suivante :

- 1- Huiler les moules.
- 2- Vérifier le serrage des moules.
- 3- Préparer un mélange homogène du béton (ciment sable et gravier), bien déterminé, avec un rapport E/C bien précis, puis poser le béton frais dans le récipient.
- 4- Remplir les moules par le béton frais avec la pelle métallique.
- 5- Vibrer le béton.
- 6- Une fois le moule est rempli, araser la surface à l'aide d'un réglet.
- 7- Décoffrer le moule après 24 heures.
- 9- Répéter la même opération pour les différentes compositions.

**a- Malaxage :** le malaxage est effectué dans une bétonnière et le volume de la gâchée doit être compris entre la moitié et le tiers du volume total de la cuve.

**b- essai sur béton frais :** mesure de l'affaissement à l'aide du cône d'Abrams , le béton utilisé pour cet essai, prélevé aussitôt le malaxage terminé, ne doit pas être utilisé pour la confection des éprouvettes NF P 18-451.

**c- Moule et éprouvettes :** En ce qui concerne les moules et éprouvettes, leurs dimensions, leurs tolérances de forme, etc., seront selon les normes NF P 18-401 et NF P 18-402.

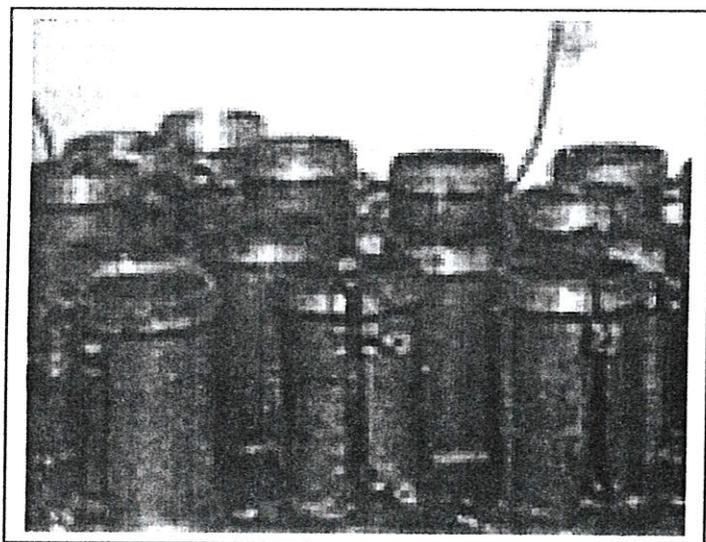


Figure IV.3.1 : les moules utilisés

**d- Remplissage du moule :** pour faciliter le démoulage, on a enduit les parois latérales d'une légère couche d'huile ( la graisse et l'huile employées en doivent pas être réactives au liant ). Introduire le béton dans les moules au moyen d'une truelle ou d'une pelle à coque cylindrique de dimension appropriée au volume des éprouvettes : accompagner l'introduction d'un mouvement de répartition .

---

**e- Démoulage :** le démoulage s'effectue après 24 heures [23].

La même technique de confection des éprouvettes de béton a été suivie par les différentes compositions testées.

**Remarque :** les éprouvettes ont été conservées à la température et à l'humidité relative ambiante au niveau du laboratoire (LGCH).

#### IV.4 Résultats d'essais sur les éprouvettes

Les résultats des essais expérimentaux effectués sont présentés dans l'ordre suivant :

- Détermination de la résistance en compression par l'essai non destructif (Scléromètre)
- Détermination de la résistance en compression par l'essai destructif ( presse)
- Détermination de la résistance en compression par l'essai non destructif par la détermination des vitesses de propagation d'ondes ultrasoniques.

Ces propriétés sont déterminées pour différents âges du béton.

Ces résultats sont regroupés dans les tableaux qui suivent :

*Tableaux IV.4 Résultats d'essais*

#### pour la composition du béton type B1 :

Les dosages en matériaux secs :

Sable = 500 kg/m<sup>3</sup>

Gravier 5/15 = 928 kg/m<sup>3</sup>

Gravier 15/25 = 232 kg/m<sup>3</sup>

Ciment = 440 kg/m<sup>3</sup>

E = 220 kg/m<sup>3</sup>

---

2320 kg/m<sup>3</sup>

S/G+S = 0.30

E/C = 0.50

A=11.50 cm

Age du béton : 07 jours

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	1.5	12.75
02	2.4	12.75
03	3.0	16.15
04	2.2	16.15
05	3.4	12.75
06	1.3	12.75
	Moyenne	13.88 ± 1.69

S : est l'écart type entre mesures , ce paramètre est calculé et affiché à partir de la septième mesure, des dix coups du marteau du scléromètre.

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	-	-
03	-	-
04	374.0	18.60
05	-	-
06	330.2	16.51
	Moyenne	17.55 ± 1.04

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T(μs) V(Km/s)	ED (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T(μs) V(Km/s)	ED (Mpa) R (Mpa)
01	T=78.2 V=4.093	36808 22.55	T=89.1 V=2.918	18708 19.45	T=57.9 V=2.244	11063 18.27	T=86.9 V=3.681	29771 21.29
02	T=86.8 V=3.685	29835 21.30	T=134.1 V=1.939	8260 17.86	T=55.90 V=2.324	11866 18.39	T=88.9 V=3.598	28443 21.06
03	T=78.9 V=4.054	36110 22.42	T=129.8 V=2.004	8823 17.94	T=54.3 V=2.392	12571 18.50	T=84.0 V=3.809	31877 21.66
04	T=77.8 V=4.115	37205 22.62	T=99.8 V=2.606	14921 18.86	T=54.7 V=2.377	12414 18.48	T=97.3 V=3.287	23739 20.27
05	T=86.7 V=3.692	29949 21.32	T=92.7 V=2.805	17287 19.23	T=51.3 V=2.536	14130 18.74	T=96.2 V=3.327	24320 20.36
06	T=77.0 V=4.155	37932 22.76	T=95.1 V=2.734	16423 19.09	T=58.8 V=2.709	10721 18.22	T=70.7 V=4.527	45028 24.11
	<b>Moyenne ED (Mpa)</b>	34639.83 ±3486.5		1470.3 ±5224		12127.5 ± 1704.5		30529.66 ± 10644.5
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	22.16 ±0.73		18.73 ± 0.79		18.43 ± 0.54		21.42 ± 1.92

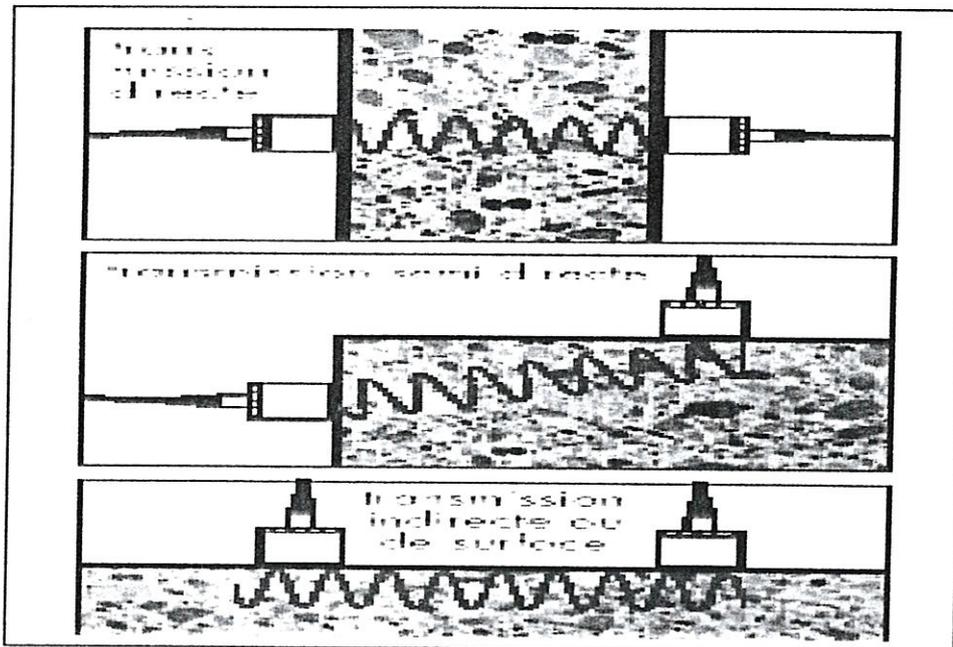


Figure III.1.2 : Types de propagation d'ondes

**Exemple de calcul :**

$$V = \frac{L}{T}$$

$$T = 78.2 \mu\text{s} = 78.2 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$L = 0.32 \text{ m} \Rightarrow V = 4092.07 \text{ m/s} \approx 4.093 \text{ Km/s} .$$

**Estimation du module élastique dynamique  $E_D$** 

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

$$\nu = 0.15 , \gamma = 2320 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow E_D = 36808 \text{ Mpa} .$$

$$R = 16.7 \exp . \frac{E_d}{122500} \Rightarrow R = 22.55 \text{ Mpa}$$

Trans : Transmission

**Age du béton : 14 jours**

\* **Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	2.8	15.3
02	0.9	13.6
03	2.3	15.3
04	-	-
05	1.8	12.75
06	-	-
Moyenne		14.23 ± 1.27

\* **La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	398.80	19.84
02	-	-
03	-	-
04	-	-
05	381.00	19.05
06	-	-
Moyenne		19.44 ± 0.39

\* **Appareil à ultrason :**

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	L=26 cm		L=26 cm		l=13 cm		L=26 cm	
	T(μs)	E <sub>D</sub> (Mpa)	T(μs)	E <sub>D</sub> (Mpa)	T(μs)	E <sub>D</sub> (Mpa)	T(μs)	E <sub>D</sub> (Mpa)
	V(Km/s)	R (Mpa)	V(Km/s)	R (Mpa)	V(Km/s)	R (Mpa)	V(Km/s)	R (Mpa)
01	T=77.4 V=4.133	37531 22.68	T=87.9 V=2.957	19211 19.53	T=42.3 V=3.076	20789 19.78	T=74.3 V=4.309	40796 23.29
02	T=79.0 V=4.050	36039 22.41	T=86.2 V=3.017	19999 19.86	T=62.80 V=2.071	9423 18.03	T=99.10 V=3.229	22908 20.13
03	T=75.5 V=4.237	39444 23.04	T=92.7 V=2.805	17287 19.23	T=47.30 V=2.750	16616 19.12	T=74.80 V=4.280	40248 23.19
04	-	-	-	-	-	-	-	-
05	T=75.5 V=4.237	39444 23.04	T=86.5 V=3.005	19840 19.63	T=61.4 V=2.116	9837 18.09	T=75.8 V=4.219	39109 22.98
06	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Moyenne</b>	38114.5		19084.2		14166.25		35765.25±
	<b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	±1702.5		± 1355.9		± 5083		8944
	<b>Moyenne</b>	22.79		19.51 ±		18.75 ±		22.39 ±
	<b>R (Mpa)</b>	±0.31		0.21		0.87		1.58

**Age du béton : 28 jours**

\*Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	4.7	19.55
03	5.4	27.2
04	-	-
05	-	-
06	-	-
	Moyenne	23.37 ± 3.82

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	430.3	21.40
03	480.9	23.92
04	-	-
05	-	-
06	-	-
	Moyenne	22.66 ± 1.26

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	-	-	-	-	-	-	-	-
02	T=77.4 V=4.133	37531 22.68	T=89.6 V=2.902	18503 19.42	T=44.6 V=2.915	18669 19.44	T=69.4 V=4.609	46674 24.44
03	T=66.8 V=4.793	50475 25.21	T=89.1 V=2.918	18708 19.45	T=40.8 V=3.189	22344 20.04	T=83.3 V=3.839	32381 21.75
04	-	-	-	-	-	-	-	-
05	-	-	-	-	-	-	-	-
06	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Moyenne</b> <b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	44003 ± 6472		18605.5 ± 102.5		20506.5 ± 1837.5		39527.5± 7146.5
	<b>Moyenne</b> <b>R (Mpa)</b>	23.94 ± 1.26		19.43± 0.01		19.74 ± 0.30		23.09 ± 1.34

**pour la composition du béton type B2 :**

Les dosages en matériaux secs :

Sable = 750 kg/m<sup>3</sup>Gravier 5/15 = 613 kg/m<sup>3</sup>Gravier 15/25 = 307 kg/m<sup>3</sup>Ciment = 440 kg/m<sup>3</sup>E = 220 kg/m<sup>3</sup>


---

 2330 kg/m<sup>3</sup>
**S/G+S = 0.45****E/C = 0.50****Age du béton : 07 jours****\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

<b>Eprouvettes</b>	<b>S : Ecart type</b>	<b>Résistance (Mpa)</b>
01	3.1	12.75
02	2.3	12.75
03	3.7	15.30
04	3.1	12.75
05	4.8	14.45
06	2.8	14.45
	Moyenne	13.74 ± 1.27

**\* La presse :**

<b>Eprouvettes</b>	<b>Charge (KN)</b>	<b>Résistance (Mpa)</b>
01	-	-
02	302.20	15.03
03	-	-
04	328.60	16.35
05	-	-
06	-	-
	Moyenne	15.69 ± 0.66

## \* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=88.20 V=3.622	28948 21.15	T=79.50 V=3.270	23595 20.24	T=56.80 V=2.288	11551 18.35	T=98.50 V=3.248	23279 20.19
02	T=86.70 V=3.692	30078 21.34	T=90.30 V=2.878	18277 19.38	T=61.90 V=2.100	9731 18.08	T=96.70 V=3.310	24176 20.34
03	T=86.30 V=3.706	30307 21.38	T=78.80 V=3.299	24015 20.31	T=68.30 V=1.903	7991 17.82	T=94.80 V=3.374	25120 20.50
04	T=76.70 V=4.173	38426 22.85	T=97.80 V=2.658	15589 18.96	T=60.40 V=2.152	10219 18.15	T=97.80 V=3.270	23595 20.24
05	T=79.30 V=4.037	35962 22.39	T=88.50 V=2.937	19034 19.50	T=62.40 V=2.083	9574 18.05	T=97.40 V=3.284	23797 20.28
06	T=79.70 V=4.015	35571 22.32	T=91.30 V=2.847	17885 19.32	T=63.50 V=2.047	9246 18.00	T=97.80 V=3.270	23595 20.24
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	33215.33 ±4739		19732.5 ±4213		9718.66 ± 1780		23927 ± 920.5
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	21.90 ±0.85		19.61± 0.64		18.07± 0.26		20.30 ± 0.15

**Age du béton : 14 jours**

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	4.8	16.15
02	-	-
03	2.0	14.45
04	4.0	17.00
05	-	-
06	3.1	14.45
	Moyenne	15.51 ± 1.27

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	-	-
03	342.50	17.04
04	-	-
05	-	-
06	341.2	17.06
	Moyenne	17.05 ± 0.01

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	L=26 cm		l=13 cm					
	T (µs)	E <sub>D</sub> (Mpa)	T (µs)	E <sub>D</sub> (Mpa)	T (µs)	E <sub>D</sub> (Mpa)	T (µs)	E <sub>D</sub> (Mpa)
	V(Km/s)	R (Mpa)	V(Km/s)	R (Mpa)	V(Km/s)	R (Mpa)	V(Km/s)	R (Mpa)
01	T=76.2 V=4.199	38906.7 22.94	T=89.30 V=2.943	19112 19.51	T=41.80 V=3.113	21384 19.88	T=84.80 V=3.775	31446 21.58
02	-	-	-	-	-	-	-	-
03	T=75.50 V=4.237	39614 23.07	T=76.50 V=3.398	25478 20.56	T=44.80 V=2.899	18545 19.42	T=80.90 V=3.954	34498 22.13
04	T=77.40 V=4.134	37711 22.72	T=86.60 V=3.002	19886 19.64	T=45.60 V=2.851	17936 19.33	T=73.60 V=4.348	41716 23.47
05	-	-	-	-	-	-	-	-
06	T=77.90 V=4.106	37202 22.62	T=86.80 V=2.994	19780 19.62	T=49.60 V=2.621	15158 18.89	T=85.50 V=3.742	30898 21.49
	<b>Moyenne</b>	38358.42		21064		18255.75		34639.5±
	<b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	±1206		±3183		± 3113		4909
	<b>Moyenne</b>	22.83		19.38 ±		19.38 ±		22.15 ±
	<b>R (Mpa)</b>	±0.22		0.52		0.49		1.49

Age du béton : 28 jours

\*Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	1.5	19.04
02	-	-
03	-	-
04	2.8	19.80
05	-	-
06	-	-
Moyenne		19.42 ± 0.38

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	376.40	18.72
02	-	-
03	-	-
04	378.10	18.80
05	-	-
06	-	-
Moyenne		18.76 ± 0.04

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte L=26 cm l=13 cm				Trans semi directe	
	T( μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	T( μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	T( μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	T( μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=74.3 V=4.304	40876 23.31	T=78.0 V=3.333	24513.39 20.39	T=46.8 V=2.777	17017.06 19.18	T=74.0 V=4.324	41257.62 23.38
02	-	-	-	-	-	-	-	-
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	T=74.5 V=4.295	40706.07 23.28	T=79.3 V=3.278	23711.04 20.26	T=45.8 V=2.838	17772.87 19.30	T=73.3 V=4.365	42043.74 23.53
05	-	-	-	-	-	-	-	-
06	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Moyenne</b> <b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	40791.03 ±84.96		24112.21 ±401.17		17394.96 ± 377.91		41650.68± 393.06
	<b>Moyenne</b> <b>R (Mpa)</b>	23.29 ±0.01		20.32± 0.06		19.24 ± 0.06		23.45 ± 0.08

**pour la composition du béton type B3 :**

Les dosages en matériaux secs :

Sable = 1000 kg/m<sup>3</sup>

Gravier 5/15 = 520 kg/m<sup>3</sup>

Gravier 15/25 = 130 kg/m<sup>3</sup>

Ciment = 440 kg/m<sup>3</sup>

E = 220 kg/m<sup>3</sup>

---

2310 kg/m<sup>3</sup>

**S/G+S = 0.60**

**E/C = 0.50**

**A=5 cm**

**Age du béton : 07 jours**

**\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	3.7	15.30
02	4.7	17.00
03	1.2	15.30
04	3.0	16.15
05	3.7	15.30
06	1.9	12.75
	Moyenne	15.30 ± 2.12

**\* La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	338.30	16.83
02	-	-
03	338.30	16.83
04	-	-
05	-	-
06	-	-
	Moyenne	16.83

## \* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T (μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T (μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=79.60 V=4.020	35354 22.28	T=96.30 V=2.699	15936 19.02	T=56.40 V=2.304	11613 18.36	T=88.20 V=3.629	28811 21.12
02	T=88.30 V=3.622	28700 21.10	T=91.10 V=2.854	17819 19.31	T=55.80 V=2.328	11856 18.39	T=85.70 V=3.735	30518 21.42
03	T=88.00 V=3.636	28922 21.14	T=109.60 V=2.372	12308 18.46	T=48.90 V=2.658	15456 18.94	T=93.90 V=3.407	25394 20.54
04	T=80.20 V=3.991	34845 22.19	T=107.30 V=2.423	12843 18.54	T=45.20 V=2.877	18107 19.36	T=86.90 V=3.681	29642 21.27
05	T=78.60 V=4.071	36256 22.45	T=89.70 V=2.899	18385 19.40	T=47.20 V=2.755	16604 19.12	T=83.60 V=3.828	32057 21.69
06	T=78.20 V=4.093	36649 22.52	T=90.40 V=2.876	18095 19.35	T=52.80 V=2.460	13239 18.60	T=74.50 V=4.294	40337 23.21
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	33454.33 ±3974.5		15897.66 ± 3038.5		14479.16 ± 3247		31126.5 ± 7471.5
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	21.78 ±0.71		19.01 ± 0.47		18.79± 0.50		21.54 ± 1.33

Age du béton : 14 jours

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	3.7	16.15
03	-	-
04	2.9	16.15
05	2.7	17.00
06	3.4	15.30
	Moyenne	16.15 ± 0.85

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	323.40	16.09
03	-	-
04	376.8	18.74
05	-	-
06	-	-
07	358.70	17.84
	Moyenne	17.41 ± 1.34

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	-	-	-	-	-	-	-	-
02	T=76.80 V=4.168	38005 22.77	T=91.70 V=2.835	17583 19.27	T=45.50 V=2.857	17857 19.32	T=80.80 V=3.958	34272 22.09
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	T=76.8 V=4.166	37968.85 22.76	T=84.30 V=3.121	21309 19.87	T=45.30 V=2.869	18007 19.34	T=73.20 V=4.373	41835 23.49
05	T=80.0 V=4.00	35003.29 22.22	T=82.00 V=3.170	21984 19.98	T=53.70 V=2.420	12812 18.54	T=82.90 V=3.860	32595 21.79
06	T=76.50 V=4.183	38279.35 22.82	T=89.30 V=2.911	18538 19.42	T=45.30 V=2.869	18007 19.34	T=81.00 V=3.950	34133 22.06
	<b>Moyenne</b> <b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	37314.12 ±1638.03		19853.5 ±2200.5		16670.75 ± 2597.5		35708.75± 4620
	<b>Moyenne</b> <b>R (Mpa)</b>	22.64 ±0.30		19.13 ± 0.40		19.13 ± 0.40		22.35 ± 0.85

Age du béton : 28 jours

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	-	-
03	-	-
04	-	-
05	2.8	20.57
06	2.2	20.74
Moyenne		20.65 ± 0.085

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	-	-
03	-	-
04	-	-
05	376.8	18.74
06	416.7	20.72
Moyenne		19.73 ± 0.99

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirect				Trans Semi-directe	
	T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
			T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)		
01	-	-	-	-	-	-	-	-
02	-	-	-	-	-	-	-	-
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	-	-	-	-	-	-	-	-
05	T=76.7 V=4.173	38096 22.79	T=81.9 V=3.174	22039.55 19.99	T=46.6 V=2.789	17017.1 19.18	T=82.2 V=3.892	33138.63 21.88
06	T=75.50 V=4.238	39292 23.01	T=81.5 V=3.190	22262.31 20.02	T=47.9 V=2.713	16102.3 19.04	T=73.9 V=4.330	41017.07 23.34
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	38694 ± 598		22150.93 ± 111.38		16559.7 ± 457.4		37077.85± 3939.22
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	22.90 ± 0.11		20.00 ± 0.02		19.11± 0.07		22.61 ± 0.73

**pour la composition du béton type B4:**

Les dosages en matériaux secs :

Sable :  $2.54 \times 243.036 = 617.31 \text{ kg/m}^3$ Gravier 5/15 :  $2.72 \times 330.79 = 899.74 \text{ kg/m}^3$ Gravier 15/25 :  $2.72 \times 101.26 = 275.42 \text{ kg/m}^3$ Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$ E =  $212.12 \text{ kg/m}^3$ 

---

2354 kg/m<sup>3</sup>**S/G+S = 0.34****E/C = 0.56****Age du béton : 07 jours****\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	10.13

**\* La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	253.80	12.69

**\* Appareil à ultrason :**

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans-semi- directe
Moyenne $E_D$ (Mpa)	6708.14	4661.43	6938.00
Moyenne R (Mpa)	17.64	17.34	17.67

**Age du béton : 14 jours****\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	10.47

**\* La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	280.20	14.01

## \* Appareil à ultrason :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans - semi- directe
Moyenne $E_D$ (Mpa)	8020.52	5524.41	8221.79
Moyenne R (Mpa)	17.83	17.47	17.85

- Age du béton : 28 jours

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	Ecart type (S)	Résistance (Mpa)
01	2.7	15.72
02	2.7	18.7
03	1.7	17.00
Moyenne		17.17 ± 1.43

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	378.5	18.83
02	294.0	14.62
03	322.2	16.03
Moyenne		16.49 ± 2.1

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans indirecte		Trans semi directe	
	T( $\mu$ s) V(Km/s)	$E_D$ (Mpa) R (Mpa)	T( $\mu$ s) V(Km/s)	$E_D$ (Mpa) R (Mpa)	T( $\mu$ s) V(Km/s)	$E_D$ (Mpa) R (Mpa)
1	T=130.30 V=2.455	13436.5 18.63	T=165.70 V=1.930	8304.20 17.87	T=185.50 V=1.720	6595.38 17.62
2	T=125.20 V=2.550	14496.52 18.79	T=114.40 V=2.790	17353.68 19.24	T=181.1 V=1.760	6905.71 17.66
3	T=122.30 V=2.610	15186.73 18.90	T=199.40 V=1.600	5707.20 17.49	T=75.50 V=4.230	39890.00 23.12
	Moyenne $E_D$ (Mpa)	14373.25 ± 875.11		10455.02 ± 5823.23		17797.03 ± 16647.31
	Moyenne R (Mpa)	18.77		18.18		19.31

**Pour la composition du béton type B5:**

Les dosages en matériaux secs :

Sable :  $2.54 \times 217.50 = 552.45 \text{ kg/m}^3$

Gravier 5/15 :  $2.72 \times 375.97 = 1022.63 \text{ kg/m}^3$

Gravier 15/25 :  $2.72 \times 97.01 = 263.86 \text{ kg/m}^3$

Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$

E =  $196.62 \text{ kg/m}^3$

---

$2385 \text{ kg/m}^3$

**S/G+S = 0.30**

**E/C = 0.56**

**Age du béton : 07 jours**

\* **Le scléromètre** : le nombre de coups  $n=10$ .

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
(1)	1.5	13.6
(2)	2.4	12.75
(3)	1.1	12.75
(4)	1.5	12.75
(5)	1.6	13.17
(6)	1.5	12.75
(7)	2.1	12.75
Moyenne		12.93 ± 0.42

\* **La presse** :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	294.20	14.71

\* **Appareil à ultrason** :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans - semi - directe
Moyenne $E_D$ (Mpa)	27070.72	12171.46	23445.37
Moyenne R (Mpa)	20.83	18.44	20.22

**Age du béton : 14 jours**

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	19.97

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	301.44	15.00

\* Appareil à ultrason :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans - semi- directe
Moyenne $E_D$ (Mpa)	28357.75	12750.12	24560.07
Moyenne R (Mpa)	21.05	18.53	20.40

**Age du béton : 28 jours**

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	21.90 ± 2.55

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	19.11 ± 1.71

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T (μs) V(Km/s)	$E_D$ , R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T (μs) V(Km/s)	$E_D$ , R (Mpa)
			T (μs) V(Km/s)	$E_D$ , R (Mpa)	T (μs) V(Km/s)	$E_D$ , R (Mpa)		
Moyenne $E_D$ (Mpa)	-	34648.2 ±1995.4	-	1923 ±2753	-	12506.40 ± 2717	-	30140.20± 5814
Moyenne R (Mpa)	-	22.16 ±0.93	-	19.54 ± 0.44	-	18.49 ± 0.41	-	21.36 ± 1.01

**pour la composition du béton type B6:**

Les dosages en matériaux secs :

Sable : = 539.39 kg/m<sup>3</sup>Gravier 5/15 : = 524.57 kg/m<sup>3</sup>Gravier 15/25 = 508.70 kg/m<sup>3</sup>Ciment = 350 kg/m<sup>3</sup>E = 221.51 kg/m<sup>3</sup>


---

 2144 kg/m<sup>3</sup>

S/G+S = 0.34

E/C = 0.63

Age du béton : 07 jours

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	15.54

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	334.40	16.72

\* Avec l'ultrason :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans - semi- directe
Moyenne E <sub>D</sub> (Mpa)	28357.75	12750.12	24560.07
Moyenne R (Mpa)	21.05	18.53	20.40

Age du béton : 14 jours

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	16.15

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
(1)	411.96	20.50

\* Appareil à ultrason :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans - semi- directe
Moyenne E <sub>D</sub> (Mpa)	21475.59	25756.66	20828.40
Moyenne R (Mpa)	19.90	20.60	19.79

**Age du béton : 28 jours**

\* **Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
02	5.3	25.50
03	4.5	27.20
04	2.0	26.35
	Moyenne	26.35 ± 0.85

\* **La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
02	480.70	23.91
03	447.20	21.99
04	387.30	19.27
	Moyenne	21.72 ± 2.31

\* **Appareil à ultrason :**

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
02	T=83.20 V=3.85	30096 21.35	T=41.90 V=6.21	78304	T=45.20 V=2.88	16841 19.63	T=81.00 V=3.95	31680
03	T=88.10 V=3.63	29755 21.29	T=80.40 V=3.235	21249 19.86	T=54.60 V=2.38	11501 18.34	T=87.70 V=3.65	27051
04	T=85.90 V=3.72	28098 21.00	T=92.90 V=2.82	16147 19.05	T=59.00 V=2.20	9827 18.09	T=93.20 V=3.43	23888
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	29316.33 ±999.0		18698 ±2551		12723 ± 3507		27539.66 ± 2314.50
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	21.21 ± 0.17		19.45 ± 0.41		18.68 ± 0.77		20.91 ± 0.66

**pour la composition du béton type B7 :**

Les dosages en matériaux secs :

Sable =  $613.82 \text{ kg/m}^3$

Gravier 5/15 =  $628.89 \text{ kg/m}^3$

Gravier 15/25 =  $609.82 \text{ kg/m}^3$

Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$

E =  $196.63 \text{ kg/m}^3$

---

$2399 \text{ kg/m}^3$

**S/G+S = 0.33**

**E/C = 0.56**

**Age du béton : 07 jours**

\* **Le scléromètre** : le nombre de coups  $n=10$ .

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	15.37

\* **La presse** :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	370.20	18.51

\* **Appareil à ultrason** :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans - semi- directe
Moyenne $E_D$ (Mpa)	28822.42	17500.18	27209.46
Moyenne R (Mpa)	21.13	19.26	20.85

**Age du béton : 14 jours**

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
Moyenne	-	15.89

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
Moyenne	408.60	20.43

\* Appareil à ultrason :

	Trans - directe	Trans - indirecte	Trans-semi-directe
Moyenne $E_D$ (Mpa)	30091.26	18270.44	28407.25
Moyenne R (Mpa)	21.35	19.38	21.05

**Age du béton : 28 jours**

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	4.6	24.65
12	4.9	28.90
03	3.6	24.65
	Moyenne	26.06 ± 2.12

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	526.51	26.20
02	463.21	23.05
03	459.99	22.89
	Moyenne	24.04 ± 1.65

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=75.60 V=4.23	40691 23.27	T=79.50 V=3.27	24294 20.36	T=41.30 V=3.15	22543 20.07	T=80.80 V=3.96	35628 22.33
02	T=87.60 V=3.65	30301 21.38	T=81.90 V=3.14	22400 20.05	T=45.90 V=2.83	18196 19.37	T=82.80 V=3.86	33851 22.01
03	T=78.00 V=4.10	38210 22.81	T=82.40 V=3.15	22543 20.07	T=41.50 V=3.13	22258 20.02	T=83.90 V=3.82	33153 21.89
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	36400 ±5194		23079 ± 947		20999 ± 2173.5		34210.66 ± 1237.5
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	22.48 ±0.94		20.16 ± 0.15		19.82 ± 0.35		22.07 ± 0.22

**pour la composition du béton type B8:**

Les dosages en matériaux secs :

Sable =  $750 \text{ kg/m}^3$ Gravier 5/15 =  $700 \text{ kg/m}^3$ Gravier 15/25 =  $350 \text{ kg/m}^3$ Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$ E =  $205.81 \text{ kg/m}^3$ 


---

 $2355 \text{ kg/m}^3$ 
**S/G+S = 0.41****E/C = 0.58****Age du béton : 07 jours****\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	2.6	12.75
02	1.2	12.32
03	2.4	12.32
04	2.6	13.60
05	2.6	13.60
06	4.5	12.75
	Moyenne	$12.89 \pm 0.64$

**\* La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	-	-
03	250.7	12.47
04	-	-
05	-	-
06	-	-
	Moyenne	12.47

## \* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=82.8 V=3.86	33226 21.90	T=135.6 V=1.918	8204 17.85	T=74.1 V=1.755	6868 17.66	T=88.1 V=3.63	29384 21.22
02	T=92.7 V=3.45	26543 20.74	T=150.1 V=1.730	6674 17.63	T=80.1 V=1.622	5867 17.51	T=101.2 V=3.16	22268 20.02
03	T=92.6 V=3.46	26697 20.76	T=104.3 V=2.49	13826 18.69	T=56.4 V=2.30	11797 18.38	T=92.5 V=3.46	26697 20.76
04	T=96.3 V=3.32	24580 20.41	T=144.1 V=1.842	7566 17.76	T=81.4 V=1.597	5687 17.49	T=93.6 V=3.42	26083 20.66
05	T=92.8 V=3.45	26543 20.74	T=155.8 V=1.669	6212 17.56	T=83.4 V=1.559	5420 17.45	T=96.5 V=3.32	24580 20.41
06	T=93.1 V=3.44	26389 20.71	T=100.1 V=2.596	15028 18.87	T=65.3 V=1.99	8831 17.94	T=111.7 V=2.86	18241 19.38
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	27329.66 ±4323		9585 ± 408		7411.66 ± 3188.5		24542.16 ± 5571.5
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	20.87 ±0.74		18.06 ± 0.65		17.73 ± 0.46		20.40 ± 0.92

**Age du béton : 14 jours**\* **Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	1.7	15.30
02	2.5	12.75
03	-	-
04	2.1	21.25
05	3.4	21.25
06	3.4	15.30
Moyenne		17.17 ± 2.96

\* **La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	295.7	14.71
02	-	-
03	-	-
04	298.8	14.86
05	-	-
06	-	-
Moyenne		14.78 ± 0.075

\* **Appareil à ultrason :**

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=80.5 V=3.976	35253 22.26	T=102.2 V=2.54	14387 18.78	T=61.1 V=2.13	10117 18.13	T=87.1 V=3.675	30118 21.35
02	T=81.9 V=3.907	34040 22.04	T=118.1 V=2.202	10813 18.24	T=58.00 V=2.242	11209 18.30	T=88.6 V=3.610	29062 21.17
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	T=92.2 V=3.469	26836 20.79	T=99.0 V=2.85	15425 18.95	T=56.6 V=2.29	11694 18.37	T=97.9 V=3.269	23.831 20.28
05	T=90.6 V=3.533	27835 20.96	T=116.7 V=2.227	11060 18.27	T=59.00 V=2.204	10832 18.24	T=97.6 V=3.277	23947 20.30
06	T=88.8 V=3.603	28949 21.15	T=95.6 V=2.721	16511 19.10	T=48.8 V=2.663	15814 19.00	T=99.6 V=3.214	23035 20.15
	<b>Moyenne</b> <b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	30582.6 ±4208.5		13639.2 ±2849		11933.2 ± 2848.5		25998.6 ± 3541.5
	<b>Moyenne</b> <b>R (Mpa)</b>	21.44 ±0.73		18.66 ± 0.43		18.40 ± 0.43		20.65 ± 0.60

**Age du béton : 28 jours**\* **Le scléromètre** : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	1.3	17.00
03	-	-
04	-	-
05	2.4	16.75
06	3.4	12.55
	Moyenne	17.56 + 1.69

\* **La presse** :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	389.8	19.39
03	-	-
04	-	-
05	392.0	19.50
06	397.2	19.86
	Moyenne	19.58 ± 0.23

\* **Appareil à ultrason** :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
			T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	T(μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)		
01	-	-	-	-	-	-	-	-
02	T=77.6 V=4.125	37945 22.76	T=97.4 V=2.67	15897 19.01	T=57.1 V=2.27	11491 18.34	T=96.7 V=3.308	24403 20.38
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	-	-	-	-	-	-	-	-
05	T=80.7 V=3.964	35041 22.23	T=91.2 V=2.85	18113 19.36	T=55.4 V=2.35	12315 18.46	T=94.8 V=3.375	25401 20.54
06	T=86.4 V=3.704	30595 21.43	T=77.80 V=3.34	24877 20.46	T=51.9 V=2.50	13938 18.71	T=62.0 V=5.163	59444
	<b>Moyenne</b> <b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	34527.0 ±3675		12300.33 ± 2107.5		12618.33 ± 2491		24902 ± 499
	<b>Moyenne</b> <b>R (Mpa)</b>	22.14 ±1.16		18.46 ± 0.31		18.51± 0.38		20.46 ± 0.08

**pour la composition du béton type B9 avec le sable de carrière:**

Les dosages en matériaux secs :

Sable =  $750 \text{ kg/m}^3$

Gravier 5/15 =  $700 \text{ kg/m}^3$

Gravier 15/25 =  $350 \text{ kg/m}^3$

Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$

E =  $205.81 \text{ kg/m}^3$

---

$2355 \text{ kg/m}^3$

**S/G+S = 0.41**

**E/C = 0.58**

**Age du béton : 07 jours**

**\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.**

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	1.1	12.75
02	1.3	12.75
03	1.3	12.75
04	1.1	12.32
05	1.7	12.32
06	1.0	12.32
Moyenne		$12.53 \pm 0.21$

**\* La presse :**

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	-	-
03	211.0	10.49
04	-	-
05	-	-
06	198.00	09.85
Moyenne		$10.17 \pm 0.32$

## \* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T( $\mu$ s) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=92.30 V=3.466	26793 20.78	T=94.60 V=2.749	16854 19.16	T=59.60 V=2.179	10589 18.20	T=89.50 V=3.576	28520 21.07
02	T=91.90 V=3.482	27041 20.82	T=91.10 V=2.855	18179 19.37	T=56.30 V=2.308	11880 18.40	T=89.60 V=3.569	28409 21.05
03	T=88.70 V=3.606	29001 21.16	T=88.30 V=2.944	19330 19.55	T=44.30 V=2.933	19186 19.53	T=88.30 V=3.623	29275 21.20
04	T=86.70 V=3.689	30351 21.39	T=97.00 V=2.681	16031 19.03	T=47.60 V=2.728	13094 18.58	T=90.100 V=3.550	28107 21.00
05	T=93.0 V=3.441	26408 20.71	T=89.20 V=2.914	18938 19.49	T=45.40 V=2.863	12857 18.54	T=90.00 V=3.556	28202 21.02
06	T=94.40 V=3.390	25631 20.58	T=83.30 V=3.121	21724 19.94	T=45.90 V=2.832	17887 19.32	T=85.90 V=3.725	30947 21.49
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	27537.50 ±1971.5		18509.5 ±2846.5		14248.83 ± 4298.5		28910 ± 1420
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	20.90 ±0.40		19.42 ± 0.39		18.75 ± 0.66		21.14 ± 0.24

**Age du béton : 14 jours**

\* **Le scléromètre** : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	1.5	17.00
02	2.0	16.15
03	-	-
04	1.5	15.30
05	1.3	15.30
06	-	-
Moyenne		15.93 ± 1.69

\* **La presse** :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	277.5	13.8
02	-	-
03	-	-
04	235.3	11.7
05	-	-
06	-	-
Moyenne		12.75 ± 1.05

\* **Appareil à ultrason** :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T (µs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	T=87.10 V=3.675	30121 21.35	T=89.6 V=2.900	18757 19.46	T=43.20 V=3.007	20166 19.68	T=91.1 V=3.511	27493 20.90
02	T=96.9 V=3.301	24302 20.36	T=94.70 V=2.746	16817 19.15	T=51.30 V=2.533	14309 18.76	T=84.8 V=3.775	31783 21.64
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	T=83.6 V=3.829	32693 21.80	T=86.6 V=2.995	20006 19.66	T=47.60 V=2.728	16598 19.12	T=75.3 V=4.249	40266 23.19
05	T=92.7 V=3.453	26592 20.74	T=85.4 V=3.044	20666 19.76	T=45.40 V=2.863	18281 19.38	T=88.0 V=3.637	29502 21.24
06	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Moyenne</b>	28427		19061.50		17338		32261±
	<b>E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	±4195.5		±1924.5		± 2928.5		6386.5
	<b>Moyenne</b>	21.06 ±		19.50 ±		19.23 ±		21.73 ±
	<b>R (Mpa)</b>	0.72		0.30		0.46		1.14

**Age du béton : 28 jours**

\* Le scléromètre : le nombre de coups n=10.

Eprouvettes	S : Ecart type	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	1.8	16.15
03	-	-
04	-	-
05	2.5	16.15
06	-	-
	Moyenne	16.15

\* La presse :

Eprouvettes	Charge (KN)	Résistance (Mpa)
01	-	-
02	311.3	15.48
03	-	-
04	-	-
05	303.7	15.10
06	-	-
	Moyenne	15.29 ± 0.19

\* Appareil à ultrason :

Ep	Trans directe		Trans Indirecte				Trans Semi-directe	
	T( μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)	L=26 cm		l=13 cm		T( μs) V(Km/s)	E <sub>D</sub> (Mpa) R (Mpa)
01	-	-	-	-	-	-	-	-
02	T=87.1 V=3.675	30121 21.35	T=74.1 V=3.506	27415 20.88	T=55.3 V=2.352	12337 18.46	T=76.1 V=4.205	39436 23.04
03	-	-	-	-	-	-	-	-
04	-	-	-	-	-	-	-	-
05	T=83.6 V=3.829	32693 21.80	T=80.6 V=3.226	23211 20.18	T=37.4 V=3.473	26901 20.80	T=72.00 V=4.443	44027 23.92
06	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>Moyenne E<sub>D</sub> (Mpa)</b>	31407 ± 1286		25313 ± 2102		19619 ± 7282		41731.5 ± 2295.50
	<b>Moyenne R (Mpa)</b>	21.57 ±0.22		20.53 ± 0.35		19.60± 1.20		23.47 ± 0.45

## Les Normes [18], [23], [25], [26], [28]

L'ensemble des essais ont été réalisés selon les normes suivantes :

*Tableau IV.4.1 Les normes*

Les ciments	Terminologie : NF-P 15.101 Clauses et conditions générales : NF-P 15.300 Echantillon et éprouvettes : NF-P 15.301 Différents types de ciments : NF-P 15.302 à NF-P 15.310
Les granulats	Granulométrie des granulats :NF-P 18.304 Propreté des granulats : NF-P 18.301 Equivalent de sable : NF-P 08.501 Essai de Los Angeles : NF-P18-573 Essai Micro Deval : NF-P18-572
L'eau de gâchage	NF-P 18.303
La composition du béton	Essai d'étude : NF-P 18.102 Essai de convenance : NF-P 10.102
Le béton frais	Moules et éprouvettes : NF-P 18-401 et 402 Affaissement au cône d'Abrams : NF-P 18.451
Essai sur béton	Essai de compression : NF-P 18-406 Essai sclérométrique : NF-P 18-417 Essai d'auscultation dynamique : NF-P 18-418

# Chapitre V

## **INTERPRETATION DES RESULTATS**

## V Interprétation et exploitation des résultats

### V.1 Introduction

Ce chapitre consiste à présenter d'une façon globale les résultats obtenus au laboratoire et leurs interprétations afin d'en tirer les conclusions.

A partir des résultats des essais expérimentaux, nous tentons d'établir la relation existante entre les différentes propriétés étudiées, à savoir :

La vitesse des ultrasons (donc le module élastique dynamique) et la résistance du béton en fonction de l'influence :

- du rapport E/C.
- du rapport S/S+G.

### V.2 Influence du rapport E/C

On rappelle que la fluidité (ou l'ouvrabilité) est la qualité d'un béton qui permet sa maniabilité en conservant son homogénéité sur le plan pratique. En effet, la fluidité de la pâte du béton à l'état frais, la résistance du béton ainsi que le module dynamique et la vitesse des ultrasons dépendent du rapport E/C.

Nous avons étudié dans cette partie l'influence de la modification du rapport E/C sur quelques propriétés à l'état durci, à savoir :

- La résistance .
- La vitesse des ultrasons.

On s'est intéressé aussi à relier les résistances aux vitesses des pulsations des ultrasons.

#### V.2.1 La résistance

Les résistances des différents bétons sont celles déterminées par les essais destructifs (presse).

Tableau V.2.1 Relation résistance- vitesse de propagation (vpu) des ultrasons

Rapport E/C		Age ( jours)		
		07	14	28
0.50 (B1)	V (m/s)	3965.66	4164.25	4463.0
	R(Mpa)	17.55 ± 1.04	19.44 ± 0.39	22.66 ± 1.26
0.50 (B2)	V (m/s)	3874.16	4169.00	4299.50
	R(Mpa)	15.69 ± 0.66	17.05 ± 0.01	18.76 ± 0.04
0.50 (B3)	V (m/s)	3905.50	4129.25	4205.50
	R(Mpa)	16.83 ± 0.00	17.41 ± 1.34	19.73 ± 0.99
0.56 (B5)	V (m/s)	3461.92	3543.26	3915.82
	R(Mpa)	14.71 ± 0.00	15.00 ± 0.00	19.11 ± 1.71
0.63 (B6)	V (m/s)	2846.24	3252.15	3733.33
	R(Mpa)	16.72 ± 0.00	20.50 ± 0.00	21.72 ± 2.31
0.56 (B7)	V (m/s)	3561.73	3639.28	3993.33
	R(Mpa)	18.51 ± 0.00	20.43 ± 0.00	24.04 ± 1.65
0.58 (B8)	V (m/s)	3496.66	3697.60	3931.10
	R(Mpa)	12.47 ± 0.00	14.78 ± 0.07	19.58 ± 0.23

La figure V.2.1 montre les relations résistances-vpu pour différents rapports eau/ciment. On remarque que les vpu diminuent en fonction du rapport E/C pour une résistance donnée. Ceci peut être dû au fait que la résistance du béton, de rapport E/C élevé aux âges tardifs se rapproche de la résistance du béton au jeune âge.

Cependant, les bétons durcis présentent des vpu plus rapides que les bétons au jeune âge à cause d'une densité plus grande. On remarque enfin que la prédiction de la résistance à partir des vpu présente des variations comprise entre 10 et 20 Mpa, comme indiqué sur la figure V.2.1.

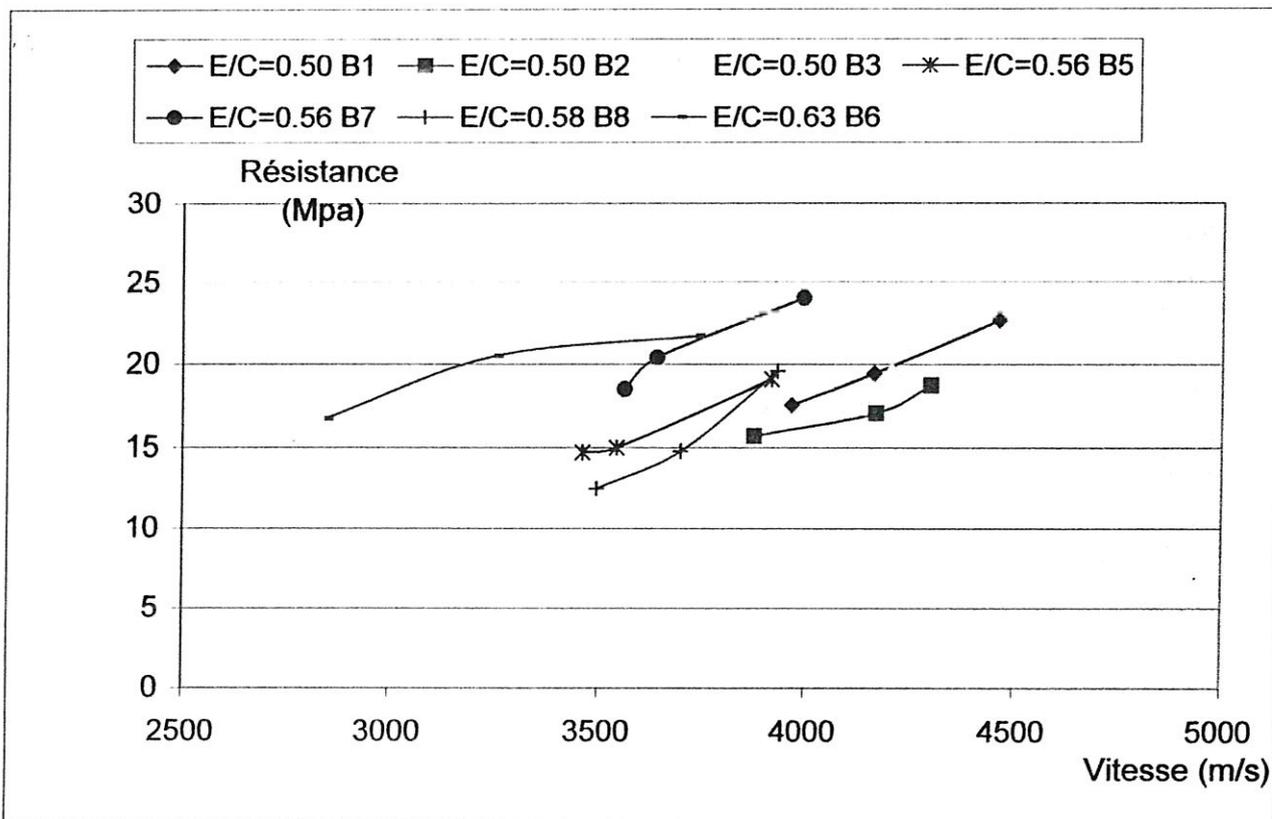


Figure V.2.1 : Relations vpu-résistances pour différents rapports eau/ciment

On donnera, à titre d'exemple, l'évolution de la résistance en fonction de la vitesse de propagation des ultrasons pour des bétons ayant le rapport S/S+G fixé à 0.30 ( béton B1 et B5)

Tableau V-2.1.1 : Relations vpu-résistances pour deux rapports E/C différents.

Rapport E/C \ Age ( jours)		07	14	28
		0.50 (B1)	V (m/s)	3965.66
	R(Mpa)	17.55 ± 1.04	19.44 ± 0.39	22.66 ± 1.26
0.56 (B5)	V (m/s)	3461.92	3543.26	3915.82
	R(Mpa)	14.71 ± 0.00	15.00 ± 0.00	19.11 ± 1.71

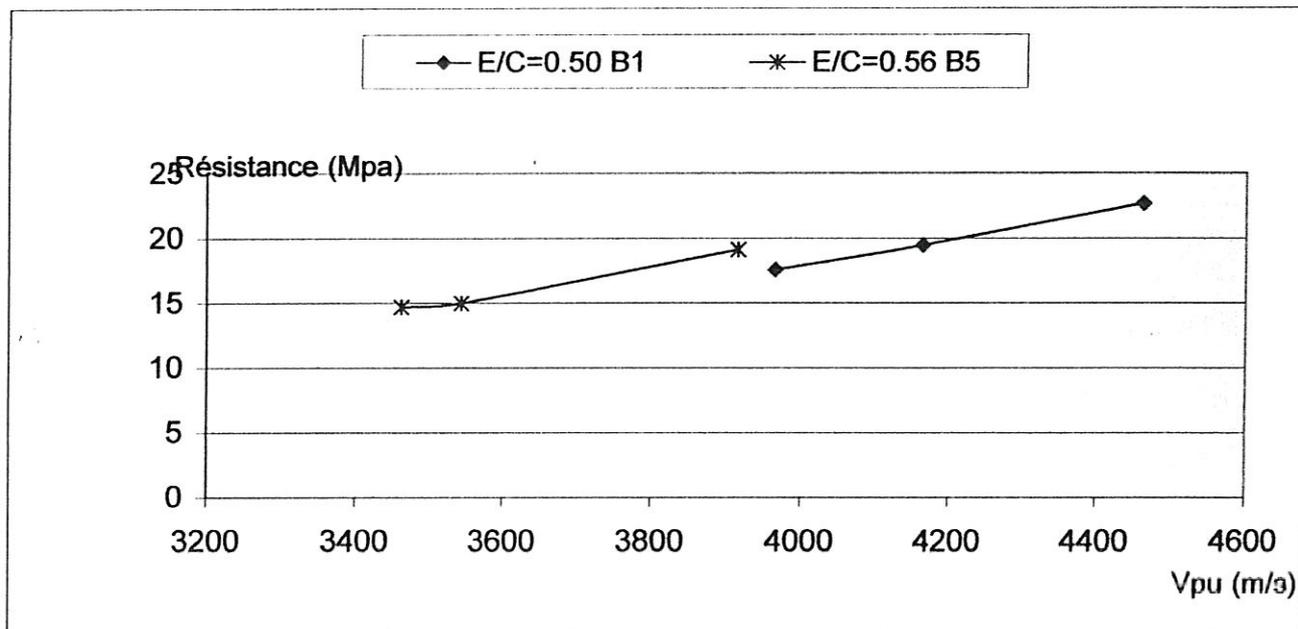


Figure V.2.1.1 Relations vpu-résistances pour deux rapports E/C différents..

Cette relation ( Résistance-vpu), pour un rapport S/S+G égal à 0.30, a pu être approchée par une courbe de lissage d'équations  $R = 3.3339 \text{Exp } 0.0004V$  avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 0.9504$ ) pour la courbe exponentielle et  $R = 10^{-6} V^2 - 0.002V + 6.6675$  avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 0.9493$ ) pour la courbe polynomiale.

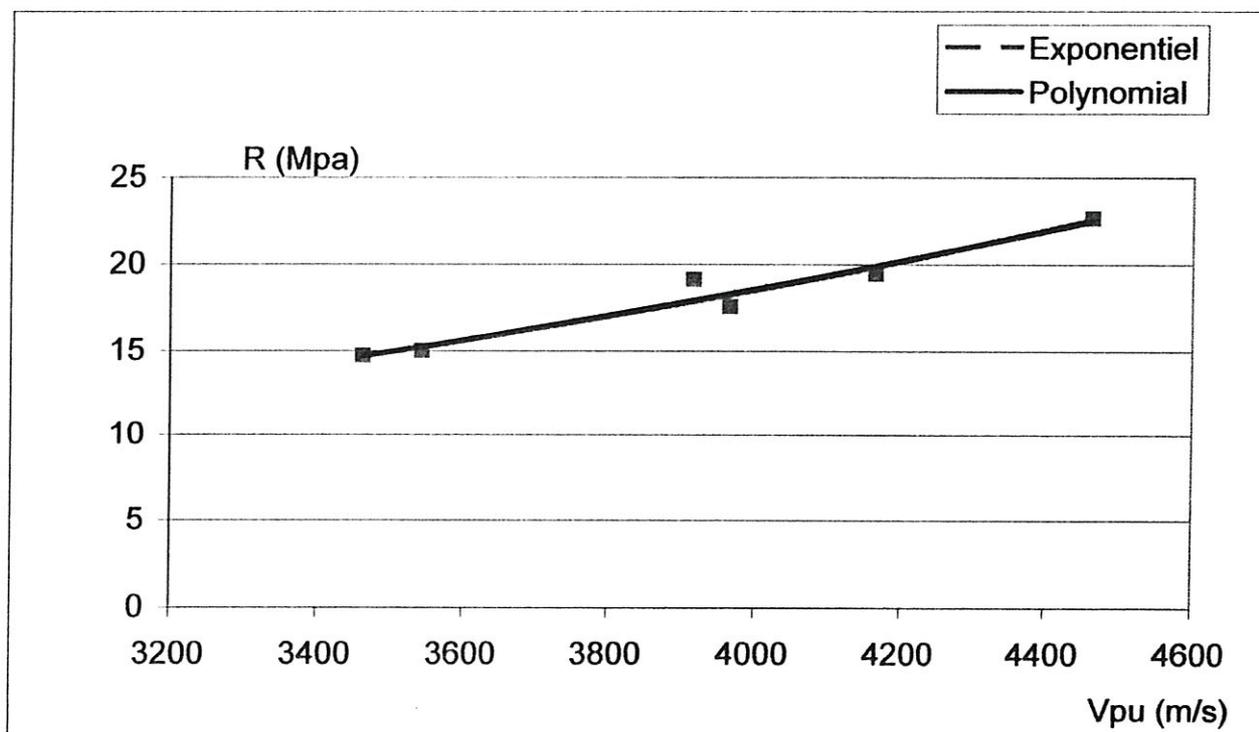


Figure V.2.1.2 courbe exponentielle et courbe polynomiale

On remarque bien que :

La résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C, et qu'elle croît avec le temps  
Les résistances à 07 jours et à 14 jours représentent respectivement 76 % et 85 % de la résistance à 28 jours et ceci pour les deux rapports E/C.

On peut faire les mêmes remarques pour les vpu. On voit bien une augmentation de la vpu en fonction de temps.

Les vpu à 07 jours et à 14 jours représentent respectivement 89% et 93 % de la vitesse à 28 jours pour E/C=0.50 et 88 % et 90 % pour E/C=0.56.

La vitesse de propagation des ultrasons diminue aussi avec l'augmentation du rapport E/C.  
Donc on remarque bien que la vpu est un bon indicateur de l'évolution de la résistance du béton. On s'est intéressé à corréler cette vitesse à la résistance pour un rapport S/S+G fixe.  
Les constatations sont aussi valables pour l'ensemble des compositions testées (voir chap IV).

### V.3 Influence du rapport S/S+G

#### V.3.1 la résistance (Relation résistance – vpu)

La figure V.3.1 montre la relation entre les vpu et les résistances de tous les essais groupés en fonction du rapport sable sur granulats (S/S+G). Les courbes de régression indiquent que les vpu augmentent quand les rapports (S/S+G) diminuent pour un niveau de résistance donné.

On remarque aussi que pour une vpu donnée, la résistance présente une différence allant de 10 à 20 Mpa dûe à la variation du rapport S/S+G.

Par conséquent, le rapport des granulats est un des facteurs importants qui influent sur la relation entre les vpu et la résistance d'un béton.

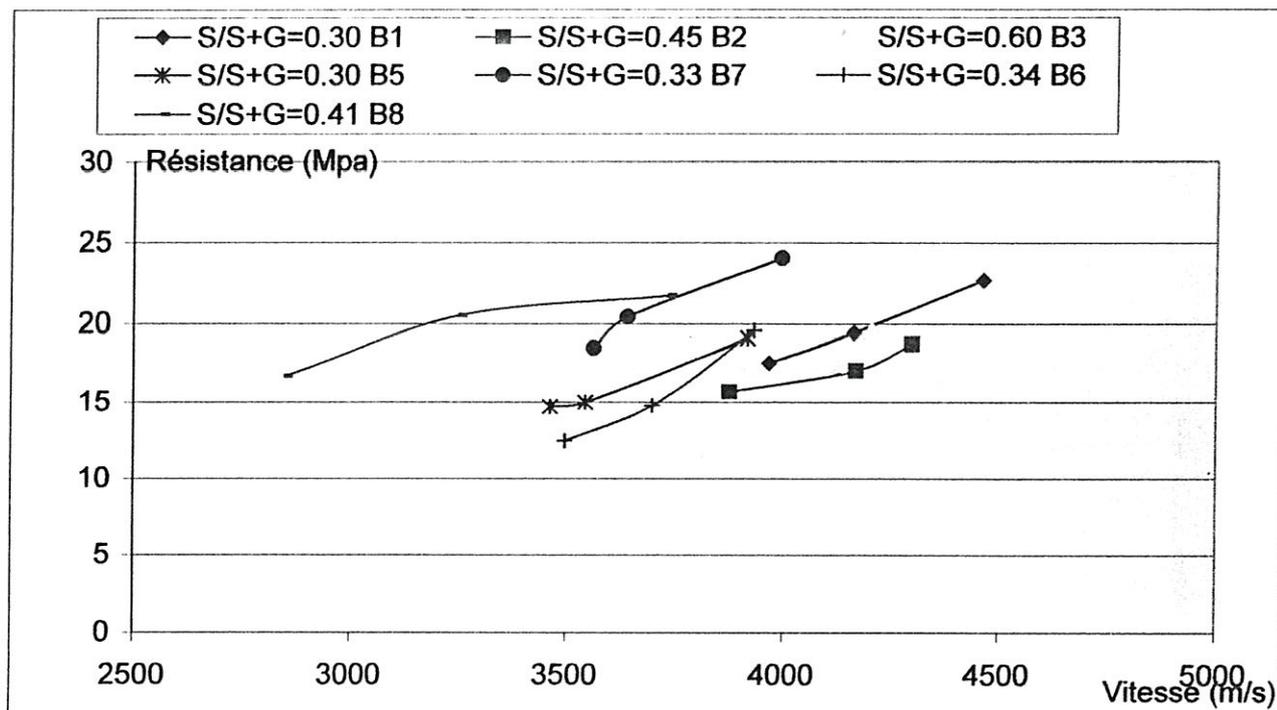


Figure V.3.1 : Relations résistances-vpu pour différents rapports S/S+G

En éliminant l'effet de l'âge, on présente cette relation pour chaque âge (07, 14, et 28 jours) en groupant les différents rapports S/S+G comme indiqué par les figures suivantes :

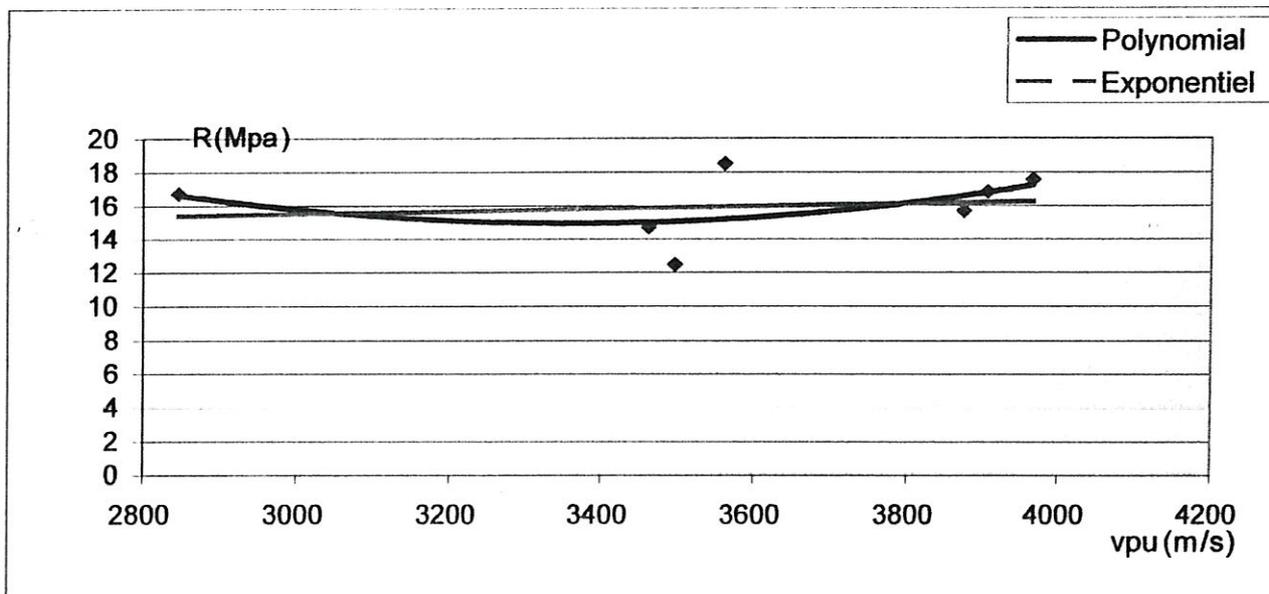


Figure V.3.2 : Relations résistances-vpu à 07 jours

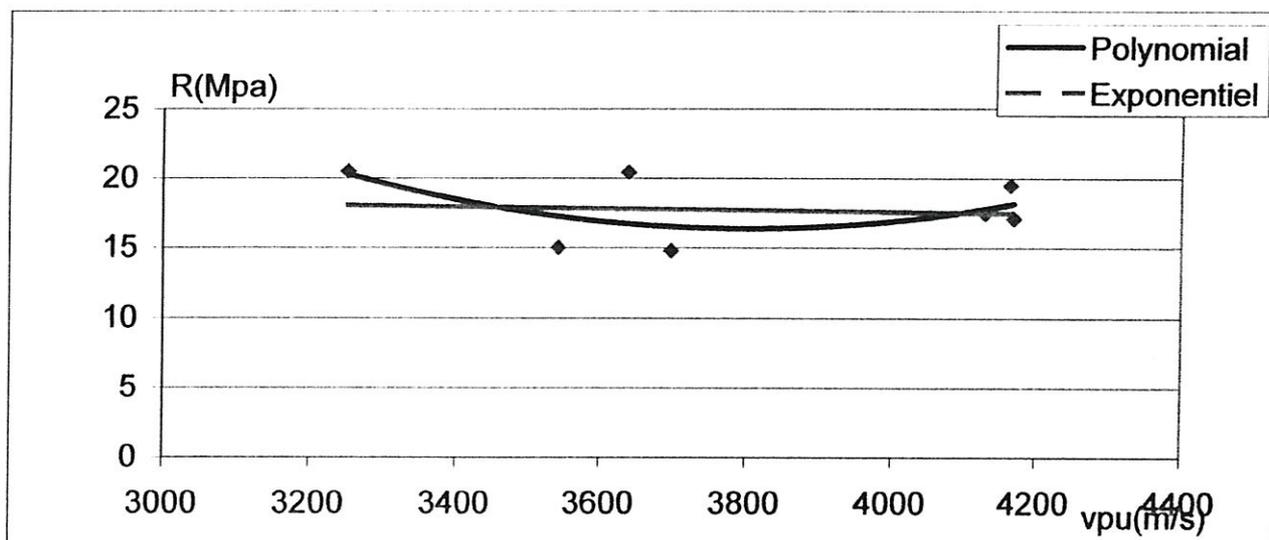


Figure V.3.3 : Relations résistances-vpu à 14 jours

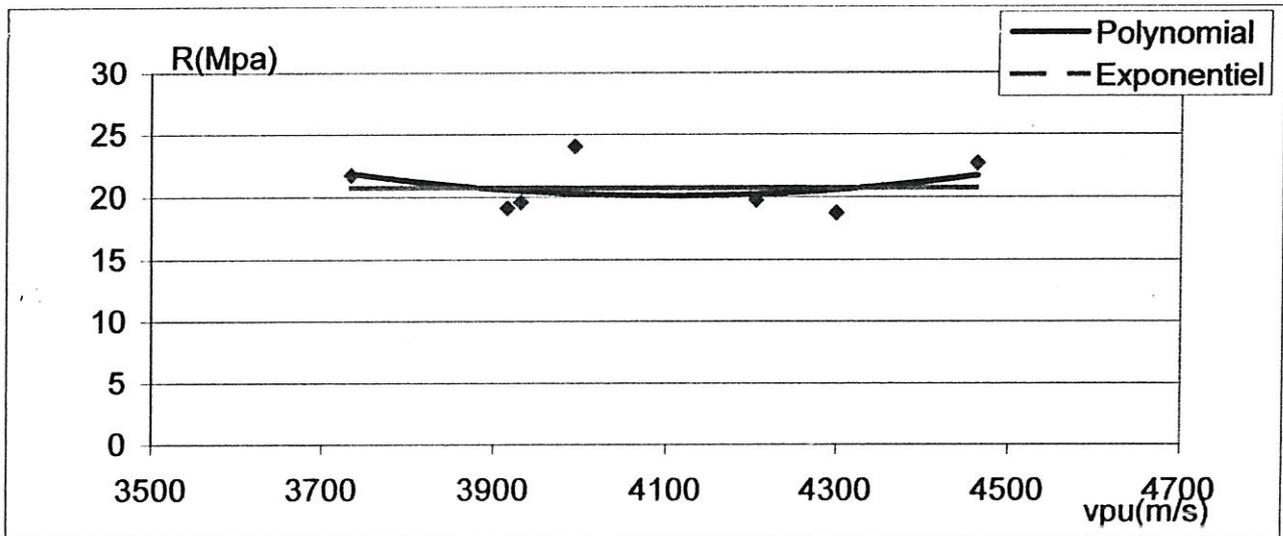


Figure V.3.4 : Relations résistances-vpu à 28 jours

Les résultats montrent que le rapport des granulats (S/S+G) influe plus sur les résistances à la compression que sur les vpu. La comparaison des figures V.3 montre que les figures V.3.2, V.3.3 et V.3.4 présentent moins de variation dans la prédiction de la résistance à la compression à partir des vpu. On a aussi une meilleure corrélation pour un âge spécifique et un même rapport S/S+G.

On peut conclure que la prédiction de la résistance à la compression en fonction des vpu comporte de larges incertitudes si on ne considère pas la variation des compositions et âges des bétons.

Pour un béton ayant un rapport S/S+G=0.30 % et une vitesse vpu de 4000 m/s, on a 03 combinaisons E/C et trois résistances différentes à 07, à 14 et à 28 jours.

Donc à une vitesse de pulsation des ultrasons donnée, la différence de  $f_c$  peut aller de 10 à 20 Mpa. Le fait de considérer l'âge et le rapport des granulats conduira à plus d'exactitude dans la prédiction de  $f_c$ .

Les courbes de tendance reliant les vitesses des ultrasons aux résistances sont présentés par les figures V.3.2, V.3.3 et V.3.4 aux différents âges. On remarque que ces courbes présentent de grandes incertitudes pour la prédiction de la résistance (le coefficient de détermination  $R^2 \ll 1.00$ ).

Les courbes exponentielles ont pour fonctions :

$R = 13.482 \text{Exp} 5 \times 10^{-5} V$  avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 0.0191$ ) à 07 jours.

$R = 20.209 \text{Exp} -4 \times 10^{-5} V$ , ( $R^2 = 0.0087$ ) à 14 jours.

Et  $R = 21.079 \text{Exp} -4 \times 10^{-6} V$ , ( $R^2 = 0.0001$ ) à 28 jours.

Et les courbes polynomiales ont pour fonctions :

$R = 6 \times 10^{-6} V^2 - 0.0425 V + 86.389$ , ( $R^2 = 0.2239$ ) à 07 jours .

$R = 10^{-5} V^2 - 0.0991 V + 204.66$ , ( $R^2 = 0.2771$ ) à 14 jours.

$R = 10^{-5} V^2 - 0.1047 V + 235.13$ , ( $R^2 = 0.1146$ ) à 28 jours.

#### V.4 Etude comparative des résistances

On s'est intéressé dans cette partie du travail à la comparaison des résistances des différents bétons (B1 à B9) déterminées par quatre méthodes différentes.

Ces méthodes sont les suivantes :

- détermination de la résistance par le scléromètre ( en fonction de la dureté de surface)
- détermination de la résistance par la presse ( en fonction de l'écrasement )
- détermination de la résistance par les vitesses de propagation ultrasoniques ( en fonction de la formule {2.3 } )
- détermination des résistances à 07 jours et 14 jours par la formule BAEL, en fonction de  $f_{c28}$  déterminées par les essais d'écrasement

Les résultats obtenus dans cette partie sont regroupés dans les tableaux qui suivent et représentés sur les figures (4 .1.1 jusqu'à 4 .1.9).

*Tableaux V 4.1 : Variation de la résistance (MPa) en fonction de l'âge du béton selon les différentes méthodes utilisées.*

##### Béton B1

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	13.88	14.23	23.37
Presse	17.55	19.44	22.66
Ultrason	22.16	22.79	23.94
Courbe BAEL	15.06	19.36	22.66

##### Béton B2

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	13.74	15.51	19.42
Presse	15.69	17.05	18.72
Ultrason	22.07	22.83	23.29
Courbe BAEL	12.42	16.03	18.76

**Béton B3**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	15.30	16.15	20.65
Presse	16.83	17.41	19.73
Ultrason	21.94	22.64	22.86
Courbe BAEL	13.06	16.86	19.73

**Béton B4**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	10.13	10.47	17.17
Presse	12.69	14.01	16.49
Ultrason	17.64	17.83	18.77
Courbe BAEL	10.92	14.09	16.49

**Béton B5**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	12.93	19.97	21.90
Presse	14.71	15.00	19.11
Ultrason	20.83	21.05	22.16
Courbe BAEL	12.65	16.33	19.11

**Béton B6**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	15.54	16.15	26.35
Presse	16.72	20.50	21.72
Ultrason	19.10	19.90	21.21
Courbe BAEL	14.33	18.56	21.72

**Béton B7**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	15.37	15.89	26.06
Presse	18.51	20.43	24.04
Ultrason	21.13	21.35	22.48
Courbe BAEL	15.92	20.54	24.04

**Béton B8**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	12.83	17.17	17.56
Presse	12.47	14.78	19.58
Ultrason	20.87	21.44	22.14
Courbe BAEL	12.96	16.73	19.58

**Béton B9**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Scléromètre	12.53	15.93	16.15
Presse	10.17	12.75	15.29
Ultrason	20.90	21.06	21.57
Courbe BAEL	10.12	13.06	15.29

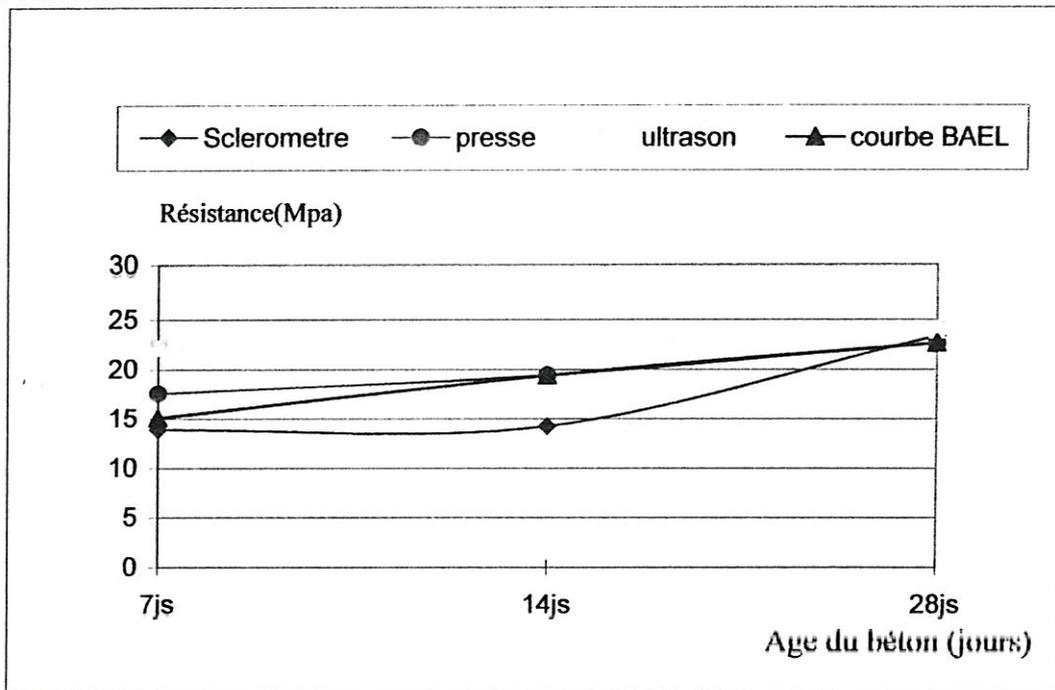


Figure V4.1.1 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B1

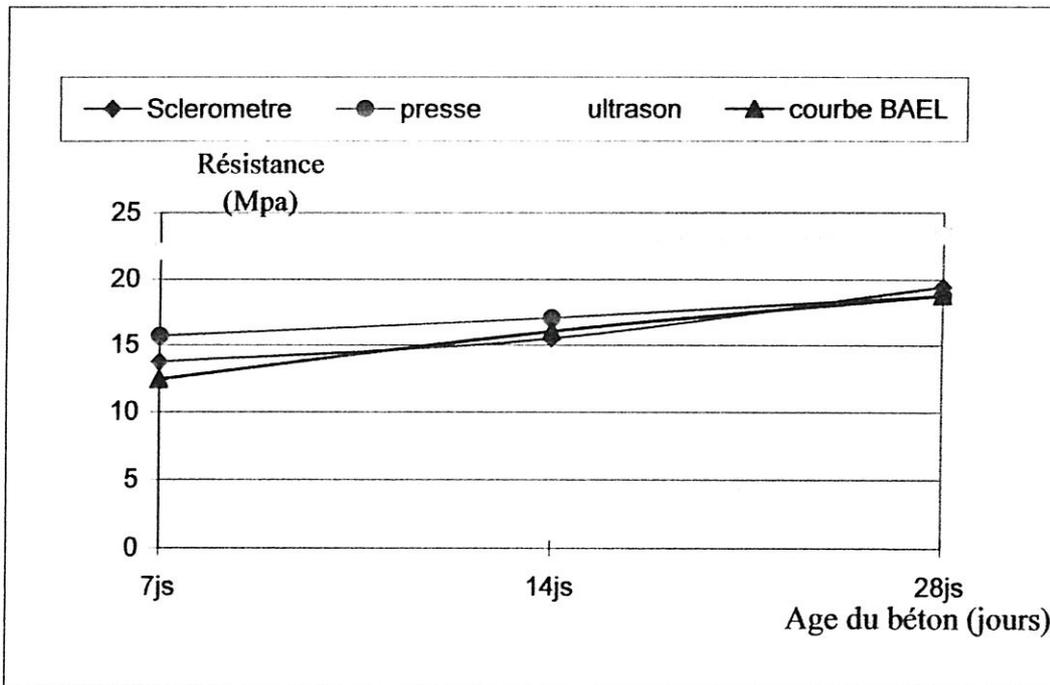


Figure V4.1.2 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B2

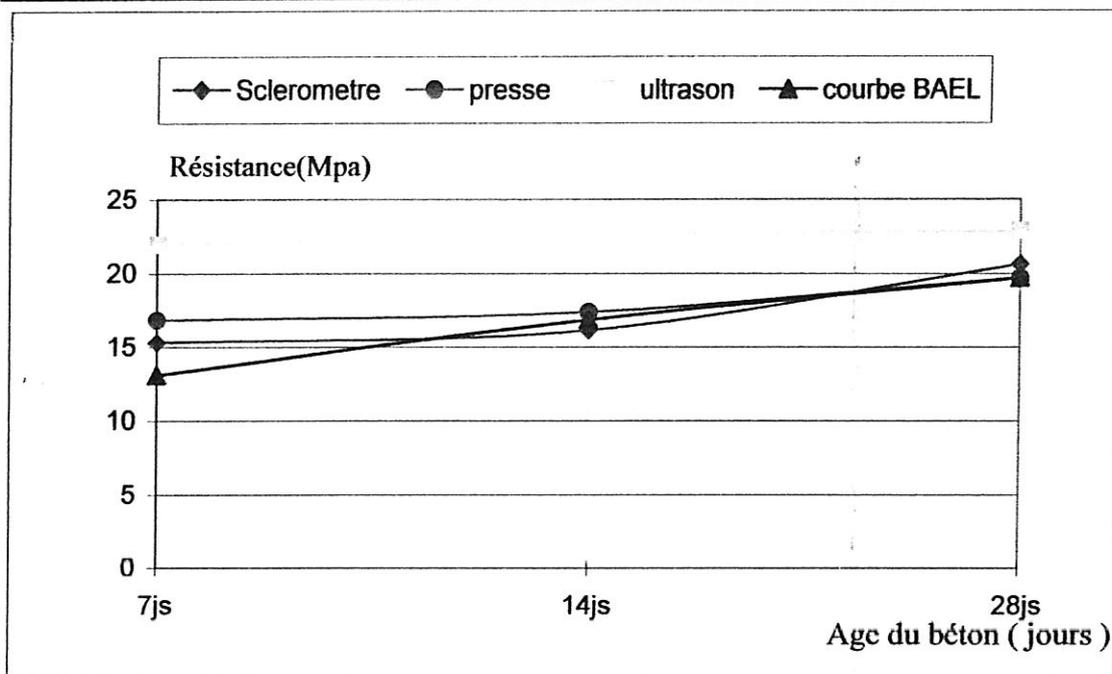


Figure V4.1.3 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B3

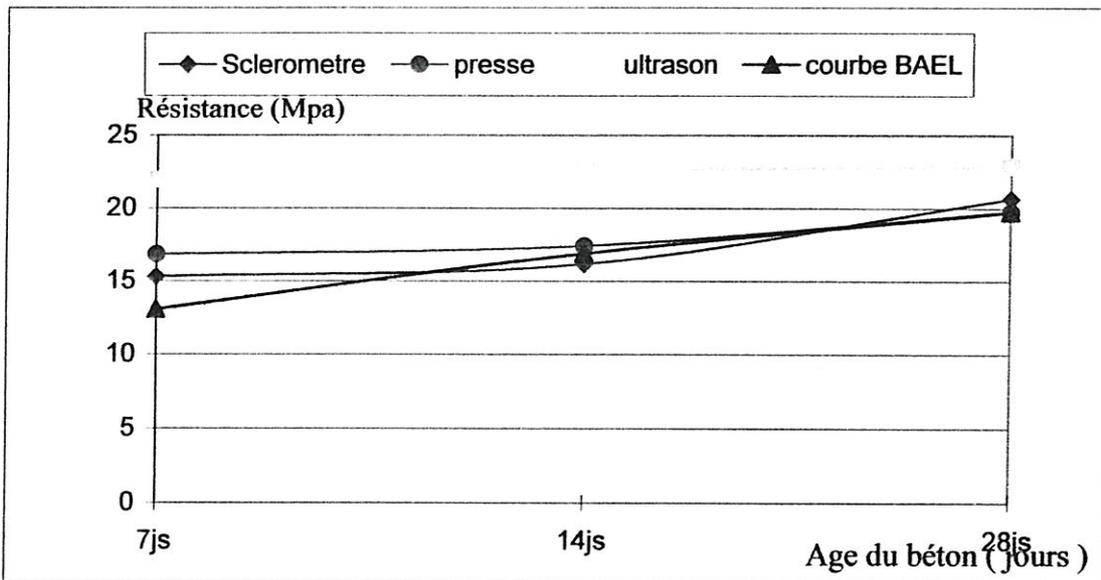


Figure V4.1.4 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B4

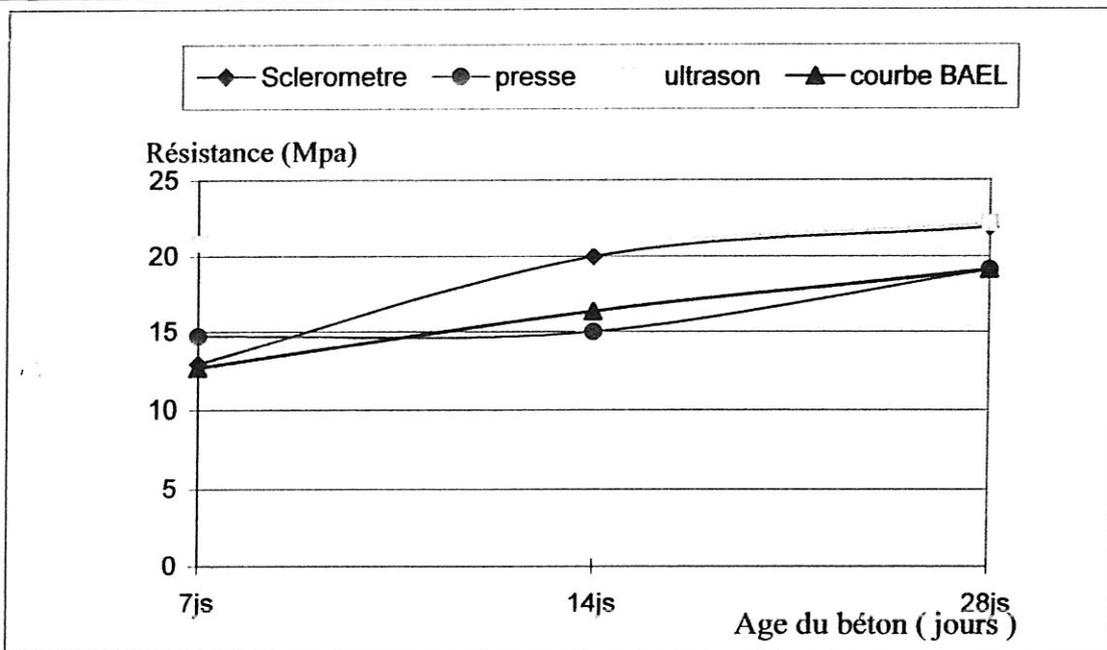


Figure V4.1.5 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B5

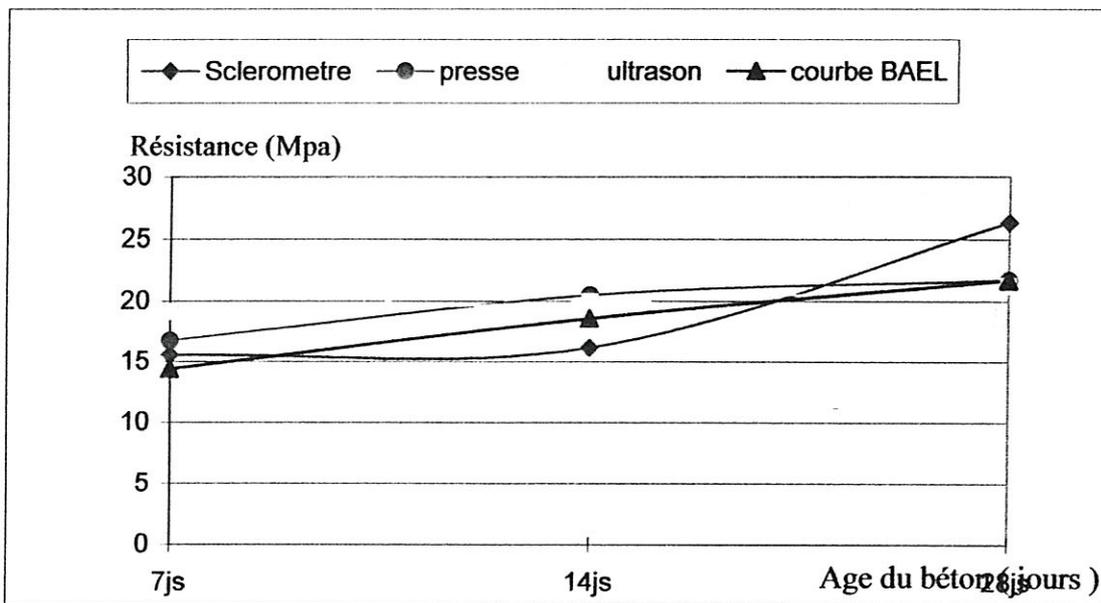


Figure V4.1.6 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B6

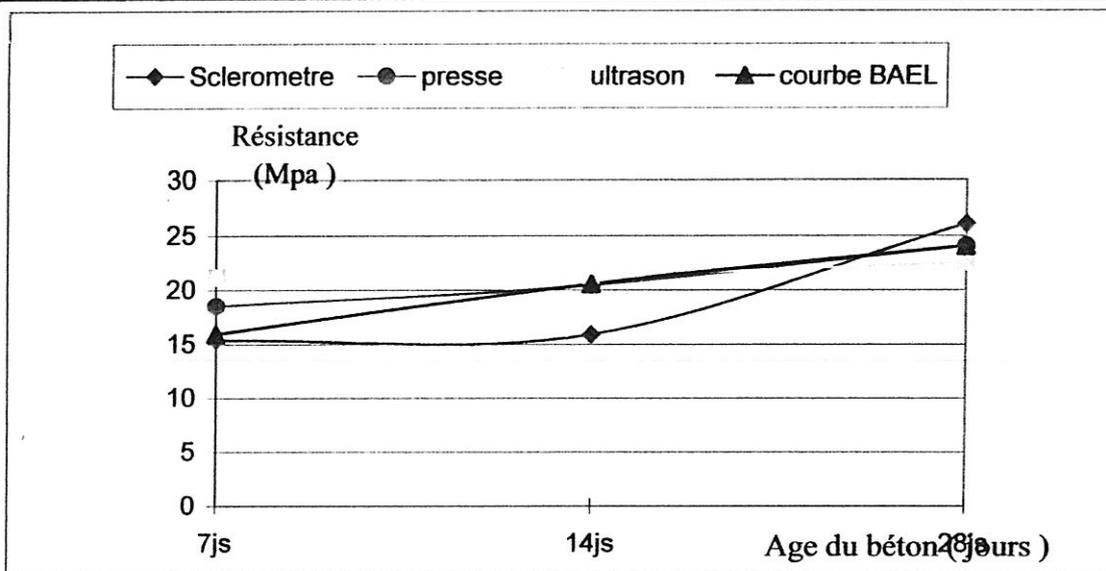


Figure V4.1.7 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B7

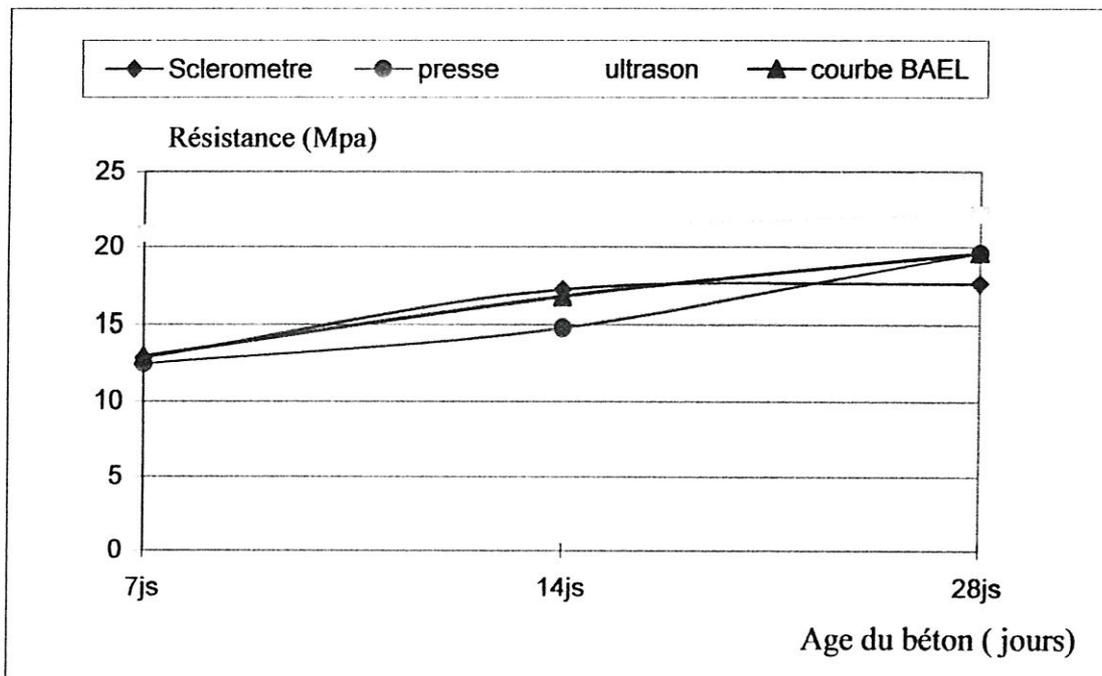
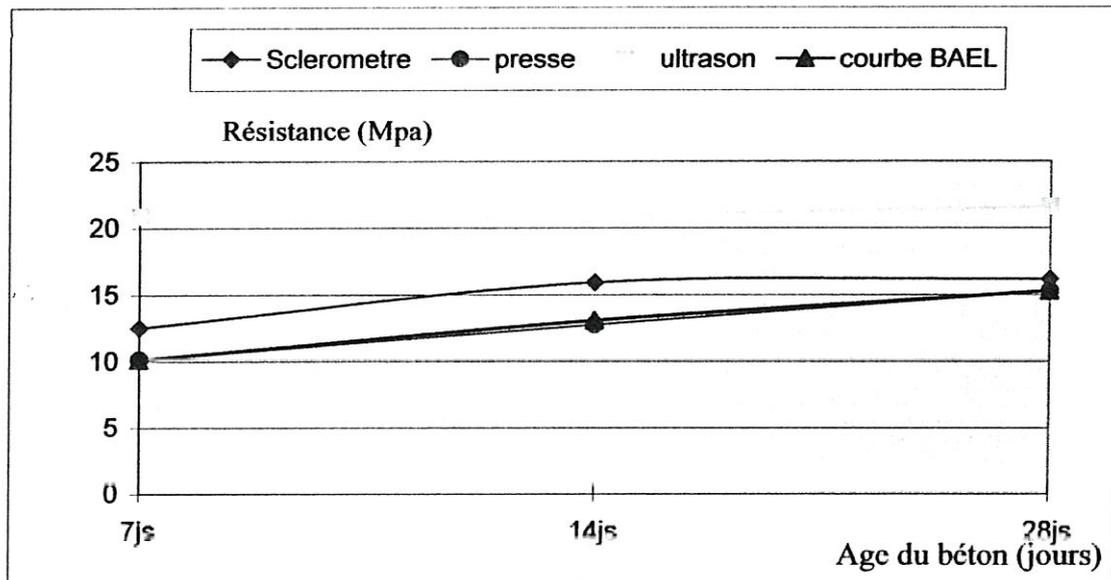


Figure V4.1.8 Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B8



**Figure V4.1.9** Evolution de la résistance en fonction de la méthode utilisée pour le béton B9

A la lecture de ces résultats, on peut remarquer que :

- Les résistances à 07 jours et 14 jours, déterminées par le scléromètre, sont toujours inférieures à celles déterminées par écrasement. Les résistances à 28 jours sont plus proches avec une légère augmentation dans le cas du scléromètre. Ce qui reflète que l'essai au scléromètre est plus adapté au cas des bétons durcis.
- Les résistances déterminées par les ultrasons sont supérieures à celles déterminées par le scléromètre et par la presse pour les différents âges du béton.
- Les résultats des résistances déduites de la formule BAEL se rapprochent de celles déterminées par la presse à 07 jours et 14 jours.

### V.5 Relation entre les modules élastiques dynamique et statique

On s'intéresse généralement dans les études des projets et évaluations des constructions, au module élastique statique du béton. Ce module statique est déterminé par des essais de chargement réalisés à la presse. Le module élastique dynamique, déterminé par la propagation des ultrasons, diffère donc du module statique. On étudie dans cette partie la corrélation qui peut exister entre ces deux modules en fonction des vpu.

#### **Remarque :**

On notera que les modules élastiques statiques n'ont pas été déterminés par les mesures directes de la déformation des éprouvettes mais qu'ils ont été déduits à partir des résistances d'essais de compression. La formule utilisée est celle énoncée dans les règles BAEL. Cette formule relie le module d'élasticité du béton à sa résistance aux différents âges. Les valeurs des deux modules d'élasticité, pour les différentes compositions, sont indiquées dans les tableaux suivants :

*Tableaux V 5.1 : Valeurs de modules d'élasticité statique et dynamique*

#### **Béton B1**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	28585.89	29577.27	31127.62
$E_d$	34639.83	38114.50	44003.00

#### **Béton B2**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	27538.08	28311.79	29228.30
$E_d$	33215.33	38358.42	40791.03

#### **Béton B3**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	28189.50	28509.67	29723.62
$E_d$	33454.33	37314.12	38694.00

**Béton B4**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	25657.43	26517.87	27998.38
$E_d$	6708.14	8020.52	14373.25

**Béton B5**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	26952.36	27128.33	29408.95
$E_d$	27070.72	28357.75	34648.20

**Béton B6**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	28127.95	30105.37	30691.11
$E_d$	16449.25	21475.59	29316.33

**Béton B7**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	29097.88	30071.06	31747.10
$E_d$	28822.42	30091.26	36400.66

**Béton B8**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	25508.29	26995.05	29648.10
$E_d$	27329.66	30582.60	34527.00

**Béton B9**

Modules (Mpa) \ Temps (jours)	7	14	28
$E_s$	23832.32	25697.80	27302.04
$E_d$	27537.50	28427.00	31407.00

Les figures suivantes présentent les comparaisons entre les modules élastiques statiques et dynamiques

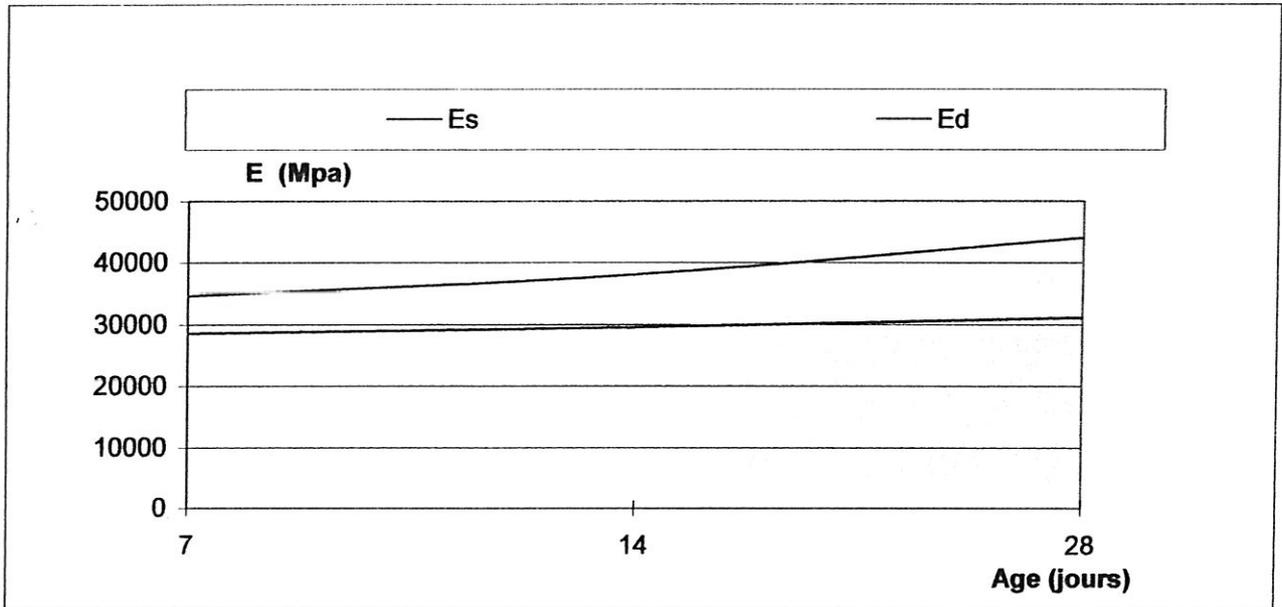


Figure V.5.1: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B1

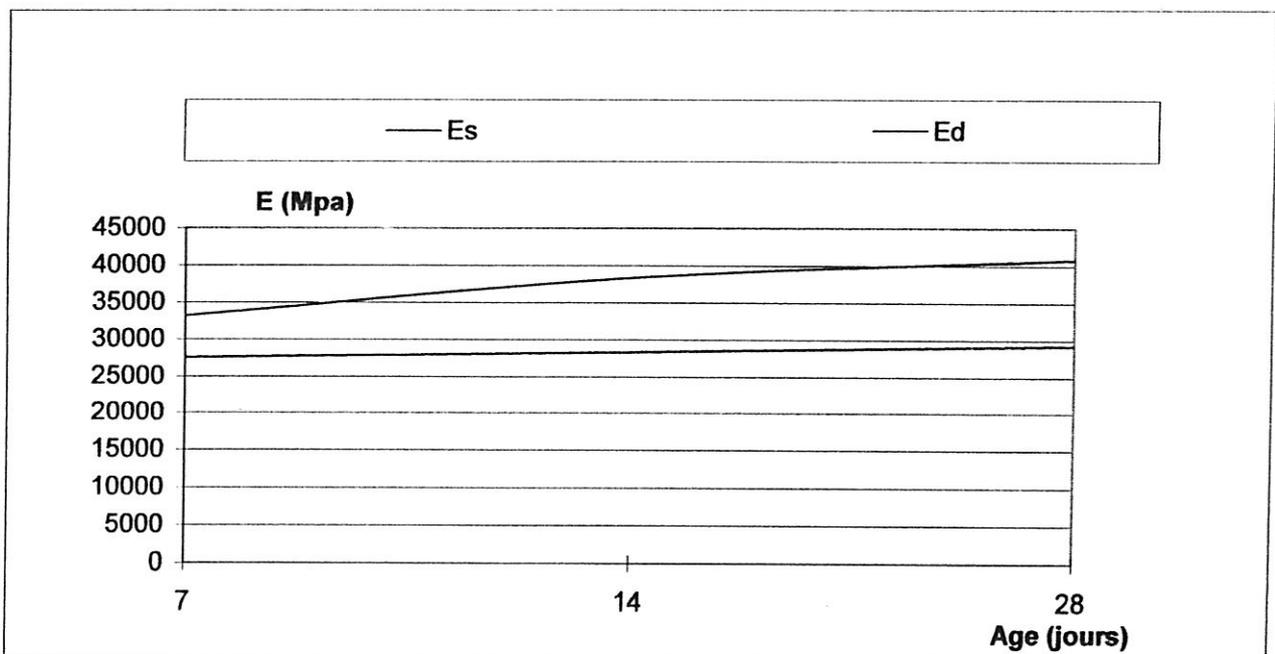


Figure V.5.2: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B2

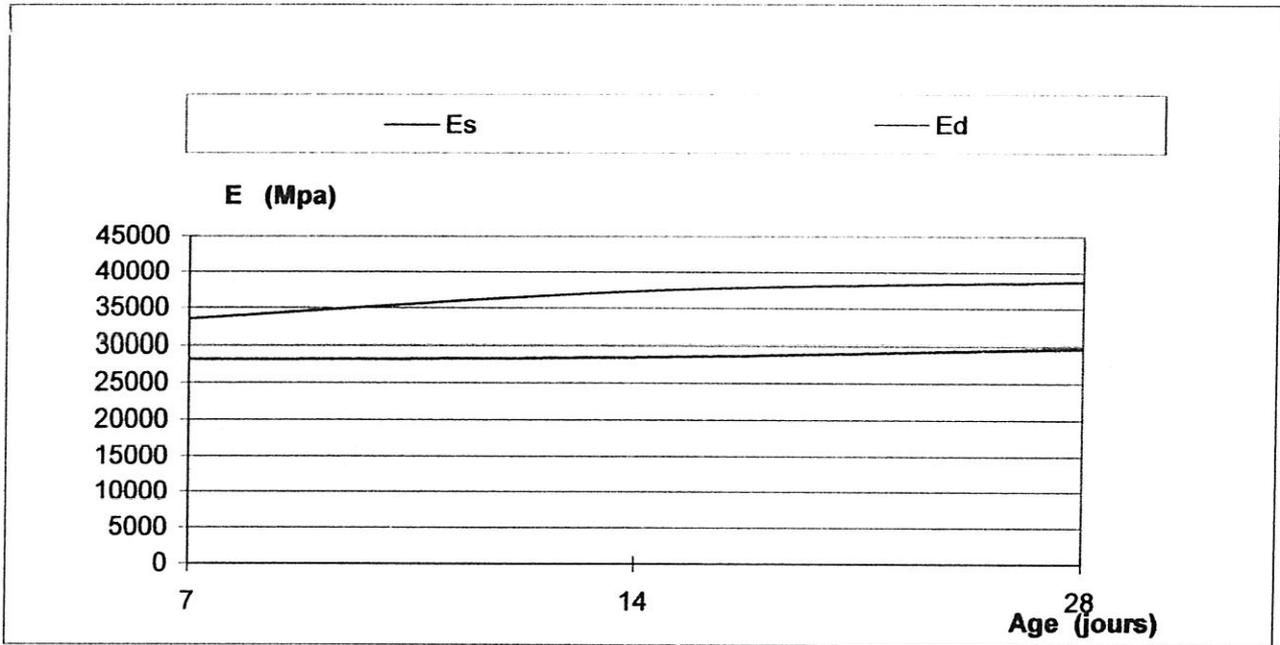


Figure V.5.3: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B3

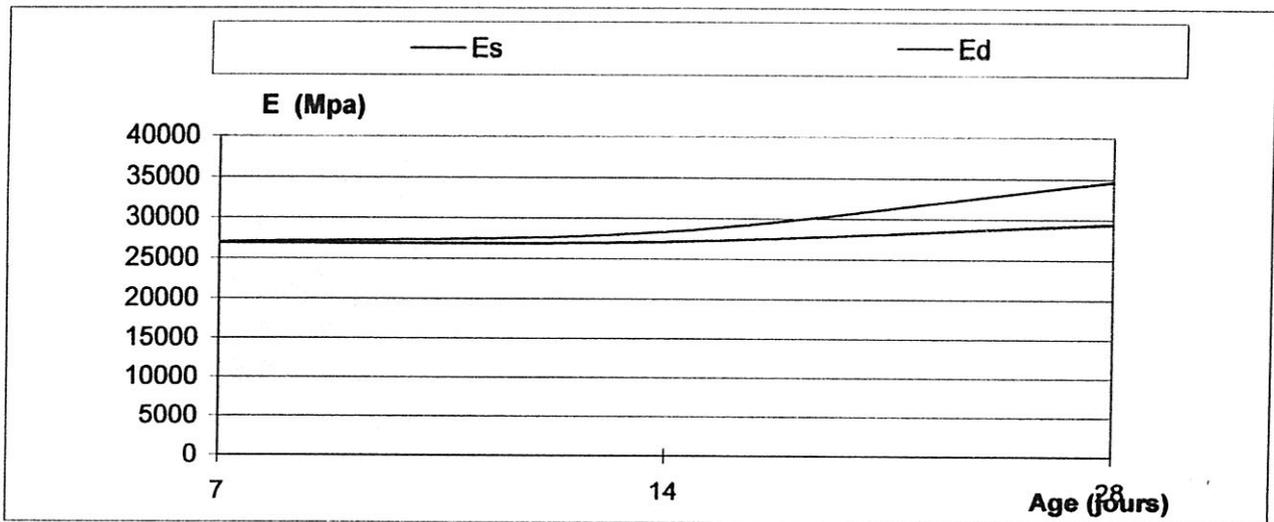


Figure V.5.4: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B5

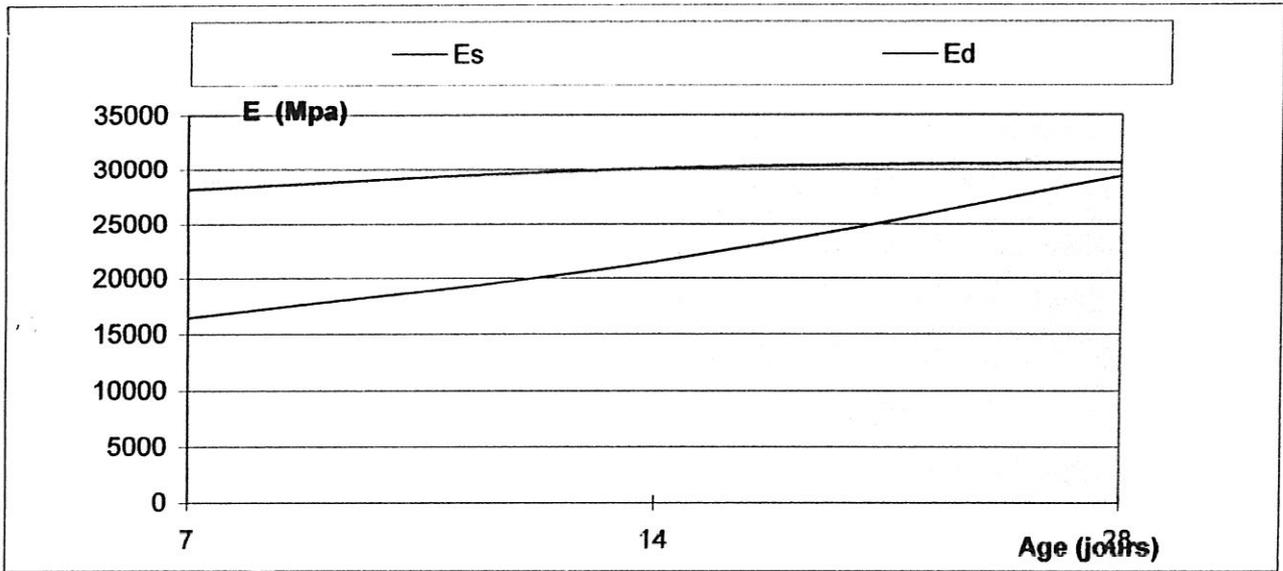


Figure V.5.5: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B6

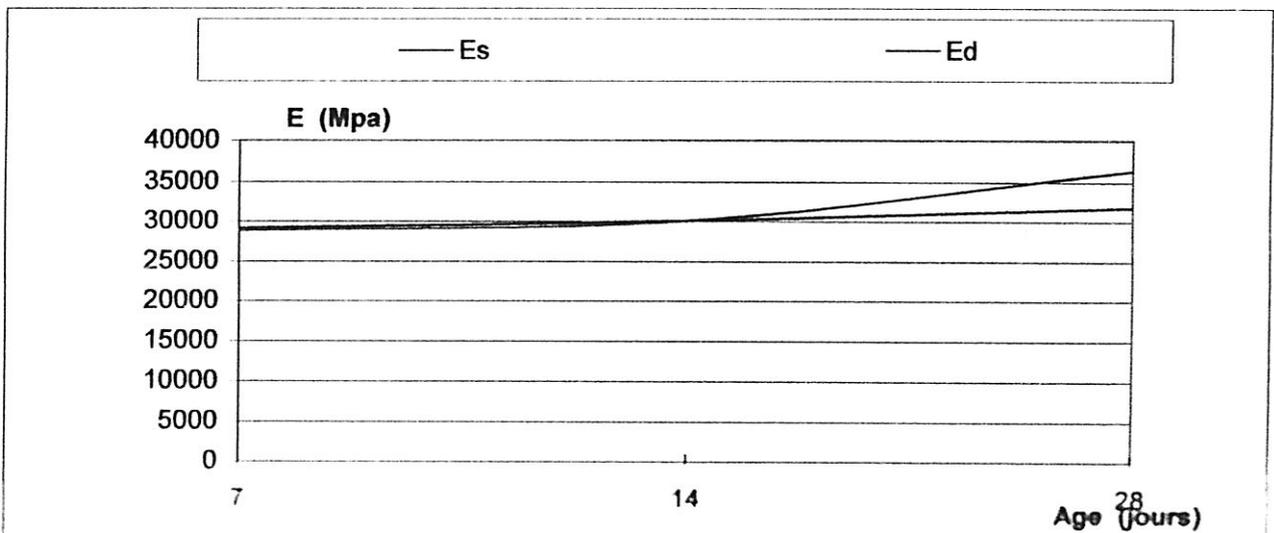


Figure V.5.6: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B7

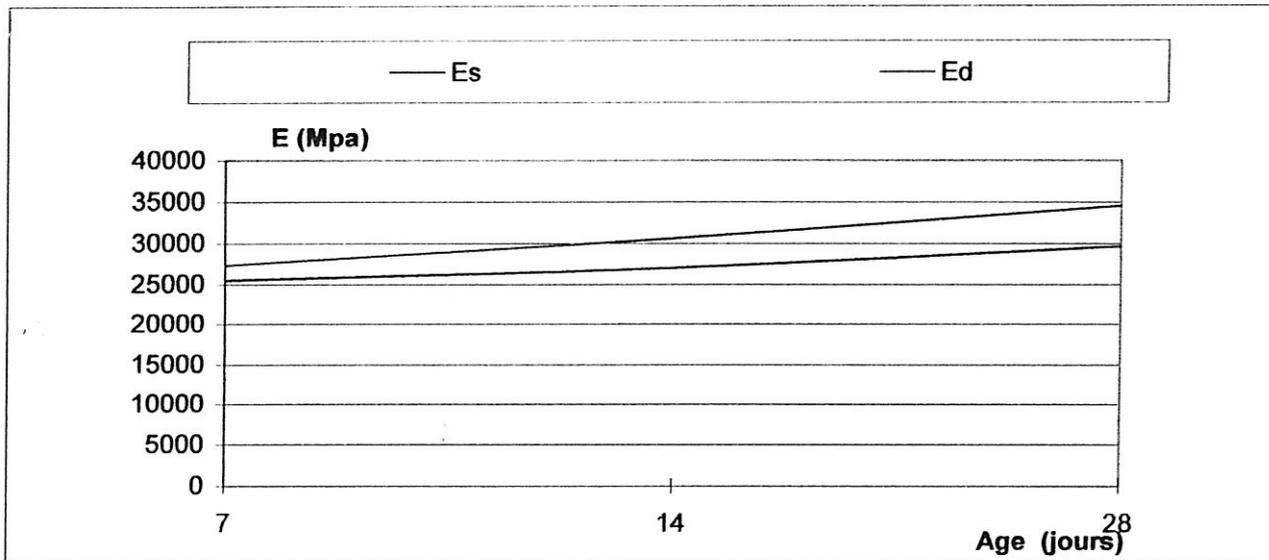


Figure V.5.7: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B8

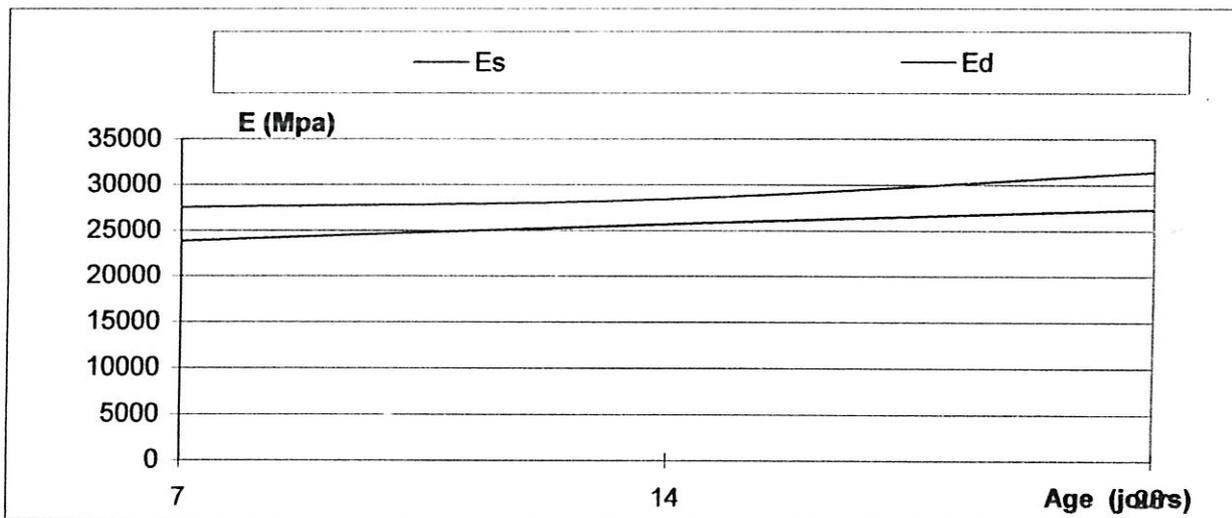


Figure V.5.8: Evolution des modules en fonction du temps pour le Béton B9

On constate que les valeurs du module d'élasticité dynamique sont généralement supérieures à celles du module statique. Cette différence varie de 20% à 40% d'où la nécessité d'une corrélation entre ces deux modules lorsque les vitesses des ultrasons sont les seules sources d'information concernant un béton. La différence entre les deux modules est plus marquée à 28 jours qu'à 07 jours. On note que les rapports sont 1,2 ; 1,3 ; et 1,4 respectivement à 07, 14 et 28 jours. On peut annoncer la relation suivante :

$$E_d = a \cdot E_s \quad \text{avec :}$$

$$a = 1,2 \text{ à } 07 \text{ jours.}$$

$$a = 1,3 \text{ à } 14 \text{ jours.}$$

$$a = 1,4 \text{ à } 28 \text{ jours.}$$

On s'est intéressé aussi à l'évolution des deux modules d'élasticité ( dynamique et statique ) en fonction des vpu. Cette relation est présentée par les figures suivantes, où on a rassemblé l'ensemble des compositions et âges des bétons.

*Tableau V.5.2: Evolution des modules en fonction des vpu*

	Age (jours)	07	14	28
Béton B1	$E_s$ (Mpa)	28585.89	29577.27	31127.62
	$E_d$ (Mpa)	34639.83	38114.50	44003.00
	V(m/s)	3965.66	4164.25	4463.00
Béton B2	$E_s$ (Mpa)	27538.08	28311.79	29228.30
	$E_d$ (Mpa)	33215.33	38358.42	40791.03
	V(m/s)	3874.16	4169.00	4299.50
Béton B3	$E_s$ (Mpa)	28189.50	28509.67	29723.62
	$E_d$ (Mpa)	33454.33	37314.12	38694
	V(m/s)	3905.50	4129.25	4205.50
Béton B4	$E_s$ (Mpa)	25657.43	26517.87	27998.38
	$E_d$ (Mpa)	6708.14	8020.52	14373.25
	V(m/s)	1742.38	1896.74	2538.33
Béton B5	$E_s$ (Mpa)	26952.36	27128.33	29408.95
	$E_d$ (Mpa)	27070.72	28357.75	34648.2
	V(m/s)	3461.92	3543.26	3915.82
Béton B6	$E_s$ (Mpa)	28127.95	30105.37	30691.11
	$E_d$ (Mpa)	16449.25	21475.59	29316.33
	V(m/s)	2846.24	3252.15	3733.33
Béton B7	$E_s$ (Mpa)	29097.88	30071.06	31747.1
	$E_d$ (Mpa)	28822.42	30091.26	36400.66
	V(m/s)	3561.73	3639.28	3993.33
Béton B8	$E_s$ (Mpa)	25508.29	26995.05	29648.10
	$E_d$ (Mpa)	27329.66	30582.60	34527.00
	V(m/s)	3496.66	3697.60	3931.10
Béton B9	$E_s$ (Mpa)	23832.32	25697.80	27302.04
	$E_d$ (Mpa)	27537.50	28427.00	31404.00
	V(m/s)	3512.33	3564.50	3752.00

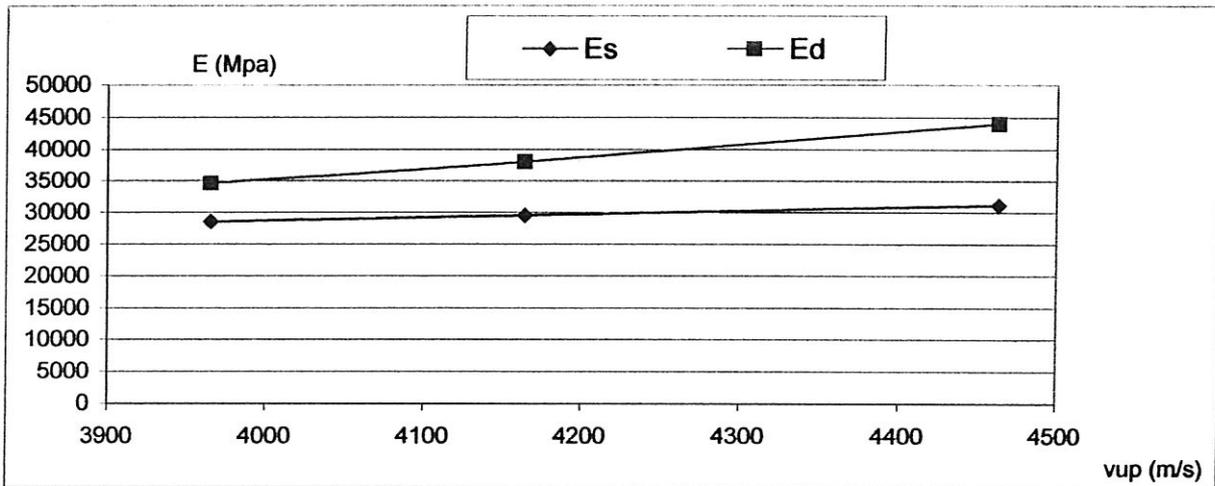


Figure V.5.9: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B1

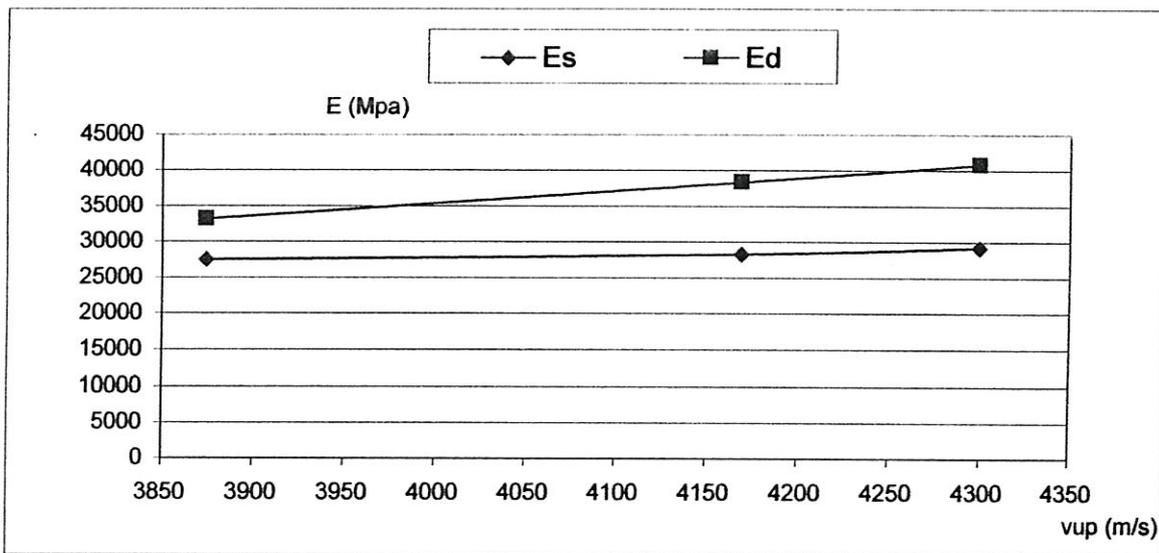


Figure V.5.10: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B2

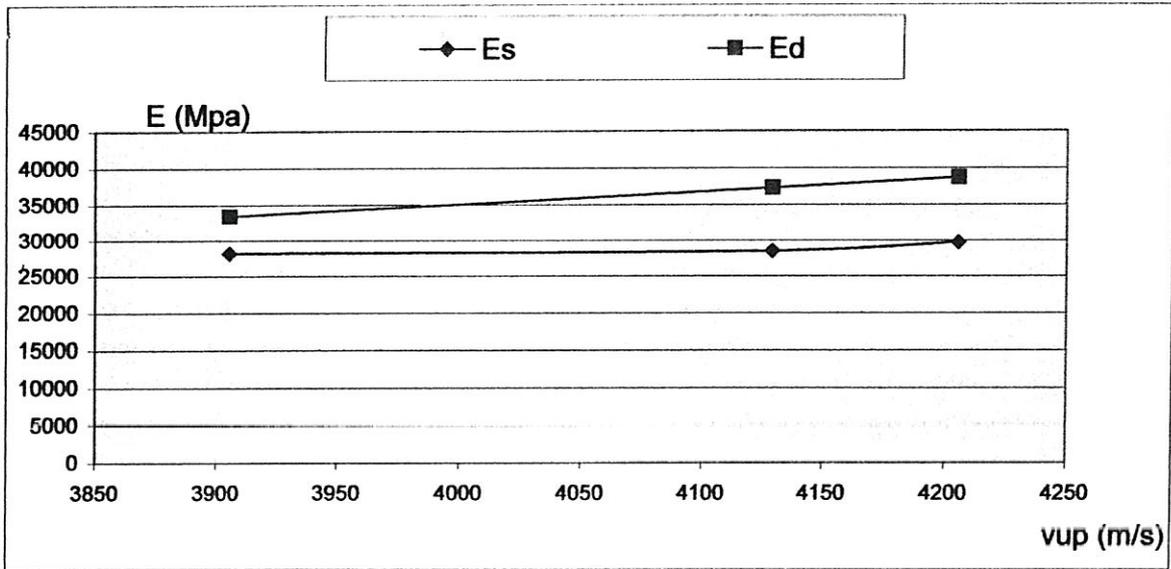


Figure V.5.11: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B3

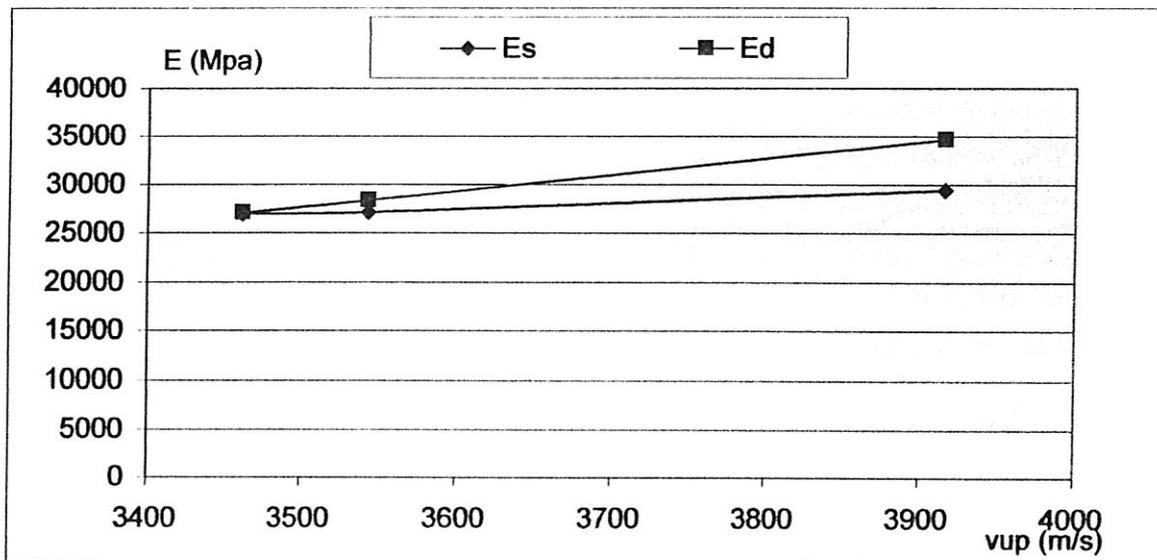


Figure V.5.12: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B5

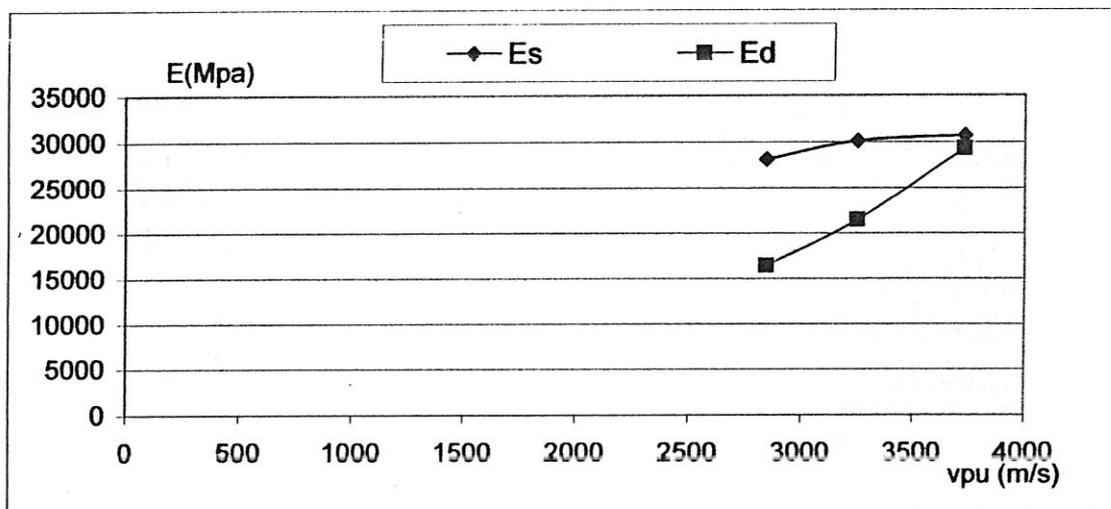


Figure V.5.13: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B6

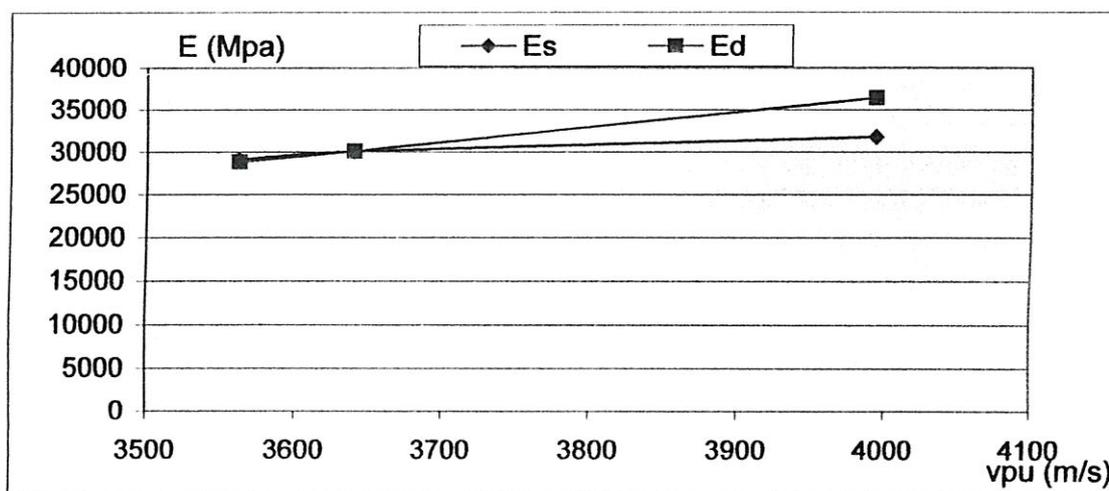


Figure V.5.14: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B7

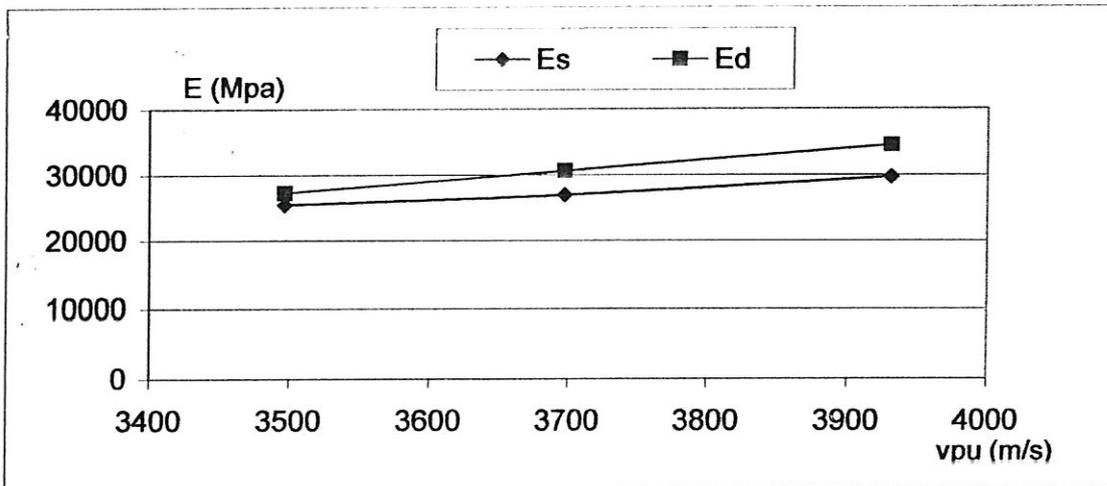


Figure V.5.15: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B8

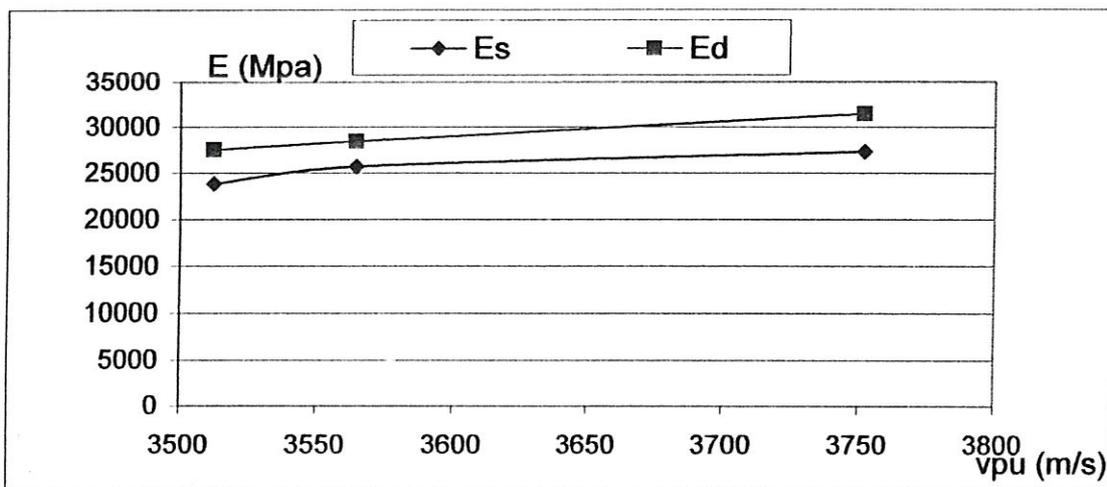


Figure V.5.16: Evolution des modules en fonction des vpu pour le Béton B9

## CONCLUSION

Cette étude a consisté en l'étude de l'influence de la variation des rapports E/C et S/S+G sur la prédiction de la résistance à la compression à partir de la mesure des vitesses de propagation des ultrasons.

On s'est aussi intéressé à la corrélation du module élastique dynamique au module élastique statique.

En se basant sur l'ensemble des résultats, certaines conclusions peuvent être annoncées :

- Les vitesses des ultrasons augmentent avec le rapport eau/ciment, pour un niveau de résistance donné.
- La prédiction de la résistance à la compression en fonction des vpu comporte de larges incertitudes si on considère pas la variation des compositions et âges des bétons.
- L'effet de la variation du rapport S/S+G sur la résistance à la compression dépend alors de la résistance et du rapport E/C du béton. Pour les bétons de résistance moyennes, la résistance augmente quand le rapport S/S+G augmente. On peut l'expliquer par le fait que la résistance à la compression est contrôlée par la résistance de la pâte et la résistance de l'interface (pâte-granulats). La densité du béton augmente avec le rapport S/S+G, ce qui conduit à moins de fissure à l'interface entre la pâte et les granulats (graviers).  
Le même phénomène ne se produit pas dans les bétons de haute résistance car leur résistances à la compression est plutôt dominée par la résistance des granulats.
- Un autre constat, qui est lié aux constatations précédentes, est qui à un niveau de résistance donné la vpu du béton augmente avec le rapport S/S+G. La variation de la vitesse diminue quand la résistance à la compression augmente par les effets de l'âge ou de la diminution du rapport E/C.
- L'estimation du module élastique statique à partir du module élastique dynamique peut être approchée par la formule linéaire  $E_d = a.E_s$  a : coefficient en fonction de l'âge du béton.
- Les résistances à 07 jours et 14 jours, déterminées par le scléromètre, sont toujours inférieures à celles déterminées par écrasement. Les résistances à 28 jours sont plus proches avec une légère augmentation dans le cas du scléromètre. Ce qui reflète que l'essai au scléromètre est plus adapté au cas des bétons durcis.
- Les résistances déterminées par les ultrasons sont supérieures à celles déterminées par le scléromètre et par la presse pour les différents âges du béton.
- Les résultats des résistances déduites de la formule BAEL se rapprochent de celles déterminées par la presse à 07 jours et 14 jours.

# **Références bibliographiques**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: **S.Balan , M.Arcan** traduit du romain par : RADU CĂLINESCU « Essai des constructions »; Editions meridiane Bucarest ; Editions Eyrolles paris .1972
- [2]: **J.Baron, R.Gagne J.P.Ollivier** « Viser la durabilité » - Les bétons bases et données pour leur formulation, Editions Eyrolles, N: 2434875 – Dépôt légal- Janvier 1997  
Paris, 2<sup>ème</sup> tirage, N: d'éditeur: 5820, pp: 307 - 360.
- [ 3 ]: **L.Baali** « perméabilité, porosité et résistance mécanique d'un béton à base de matériaux locaux comme critères de durabilité »-mémoire de magister, université de Guelma,2002.
- [4] : [http://Fr.encarta.msn.com/text\\_761558777\\_1/6Å©ton.html](http://Fr.encarta.msn.com/text_761558777_1/6Å©ton.html).
- [5]: **J.Baron** « Introduction à la durabilité des bétons »- La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-6, Paris1992, pp: 23 - 38
- [6] : **J.Mougin** « Béton armé : BAEL 91 et DTU associés » P :75-77.
- [7]: **G.Chnuillar, P.Laplante** « Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrications »- Les bétons bases et données pour leur formulation, Editions Eyrolles, N: 2434875 – Dépôt légal- Janvier 1997 Paris, 2<sup>ème</sup> tirage, N: d'éditeur: 5820, pp: 223 -275
- [8]: **P.C.Aitcin, J.Baron, J.P.Bournazel** « Viser une résistance à la compression »- Les bétons bases et données pour leur formulation, Editions Eyrolles, N: 2434875 – Dépôt légal- Janvier 1997 Paris, 2<sup>ème</sup> tirage, N: d'éditeur: 5820, pp: 278 - 305
- [9]: **Document technique réglementaire (D.T.R, BE 2-1)** « Règle d'exécution d'ouvrage en béton armé »- Imprimerie S.R.R.I, El-Biar, Dépôt Légal N:04, 2<sup>ème</sup> trimestre 1991, Alger,pp: 20 –30.
- [10]: **N.T.Tyen** « Cours de la technologie du béton »- M'sila 1990.
- [11]: **Bulletin du C.T.C / Est** « Instruction technique »- Constantine 1974, pp: 19 –25.

- 
- [12]: **R.Bertrand, C.Piketty** « Les granulats pour bétons »- Les bétons bases et données pour leur formulation, Editions Eyrolles, N: 2434875 – Dépôt légal- Janvier 1997 Paris, 2<sup>ème</sup> tirage, N: d'éditeur: 5820, pp: 65 - 86.
- [13]: **V.A.Vorobien** «Travaux pratiques des matériaux de constructions »- Printice hall, Moscou 1972, pp: 3 - 56.
- [14]: **A.kumar Mehta** « Concrete materials »- Printice hall, Moscou 1986 pp: 9 -18.
- [15]: **Y.Cheraït** « Contribution à l'étude et l'optimisation des bétons renforcés de fibres de fontes »-Thèse de doctorat, INSA, Lyon France 1991, page: 127.
- [16] . **M.Blondel** « La technique de la gammagraphie », Editions Eyrolles, Paris 1956.
- [17] : **R.Jones,I** « Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method.matériaux et construction (RILEM) nr.10 vol2 Juillet-Août 1969.
- [18] : **R.Dupain, R.Lanchon, J-C.Saint.Arroman**, Editions Casteilla.
- [19] : **R. Jones and Facaoaru** « Testing of concrete by the ultrasonic pulse method . materials and structures», vol.2,N.10, July-August 1969,P 253-661.
- [20]:<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd187f.html>.
- [21] : **Leslie,J.R,and W.J.Cheeseman**. «An ultrasonic method for studing deterioration and cracking in concrete sturtures.Amer.concrete inst.proceedings»,vol.46, Sep 1949,P17-36
- [22] : **F. Gorisse** « Essais et contrôle des bétons »,Editions Eyrolles, 1978 P 122-130.
- [23] : **N.Kedjour** «Le laboratoire du béton » , Office des publications universitaires,03-2003.
- [24]: **Recueil de normes françaises-** AFNOR, Béton et constituants du béton, Paris 1991.
- [25]: **Documents de laboratoire de mécanique de sol de l'université de M'sila**, concernant l'essai de Los-Angeles AFNOR ,Paris1978.
- [26]: **Documents de laboratoire de mécanique de sol de l'université de M'sila**, concernant l'essai de Micro-Deval AFNOR, Paris 1978, pp: 1 - 3.
- [27] : **G. Dreux** «nouveau guide du béton », Editions Eyrolles, 2<sup>ème</sup> trimestre 1981.
- [28] : **Guide technique** de construction le béton constituants et dosage .

---

[29] : **R.Lanchon** « cours de laboratoire – granulats bétons sols », Tome I, Editions Casteilla  
Paris 1989.

[30] : **D.Didier, N. Girard, M.Le Brasidec, P.Nataf, R.Pralat, J.Thiesset** « chantier  
matériel et matériaux, mise en œuvre, normalisation »

# ANNEXE I

**Influence de la nature de transmission sur les vitesses des ultrasons**

Les résultats de la variation de la vitesse des ultrasons en fonction l'âge du béton avec les différentes compositions sont représentés dans le tableau AII.1 et illustrées graphiquement sur les figures qui suivent.

*Tableaux AI.1 : Evolution de la vitesse des ultrasons (m/s) en fonction de l'age du béton*

**Béton B1**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3965.66	4164.25	4463.00
Trans-indirecte	2423.58	2724.62	2910.00
Trans-semi-directe	3704.83	4009.25	4224.00

**Béton B2**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3874.16	4169.00	4299.50
Trans-indirecte	2538.50	2977.62	3055.75
Trans-semi-directe	3292.66	3954.75	4344.50

**Béton B3**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3905.50	4129.25	4205.50
Trans-indirecte	2687.16	3009.25	3182.00
Trans-semi-directe	3762.33	4035.25	4111.00

**Béton B4**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	1742.38	1896.74	2538.33
Trans-indirecte	1446.06	1574.17	2106.66
Trans-semi-directe	1764.11	1920.40	2570.00

**Béton B5**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3461.92	3543.26	3915.82
Trans-indirecte	2321.34	2375.88	2625.70
Trans-semi-directe	3221.78	3297.48	3644.20

**Béton B6**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	2846.24	3252.15	3733.33
Trans-indirecte	3116.88	3561.59	4088.33
Trans-semi-directe	2803.03	3202.78	3676.66

**Béton B7**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3561.73	3639.28	3993.33
Trans-indirecte	2775.35	2835.77	3111.66
Trans-semi-directe	3460.64	3535.99	3880.00

**Béton B8**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3496.66	3697.60	3931.00
Trans-indirecte	1922.33	2406.90	266.60
Trans-semi-directe	3308.33	3409.00	3948.60

**Béton B9**

Temps (jours)	7	14	28
Méthodes			
Trans-directe	3512.33	3564.50	3752.00
Trans-indirecte	2695.00	2977.00	3139.25
Trans-semi-directe	3599.83	3793.00	4324.00

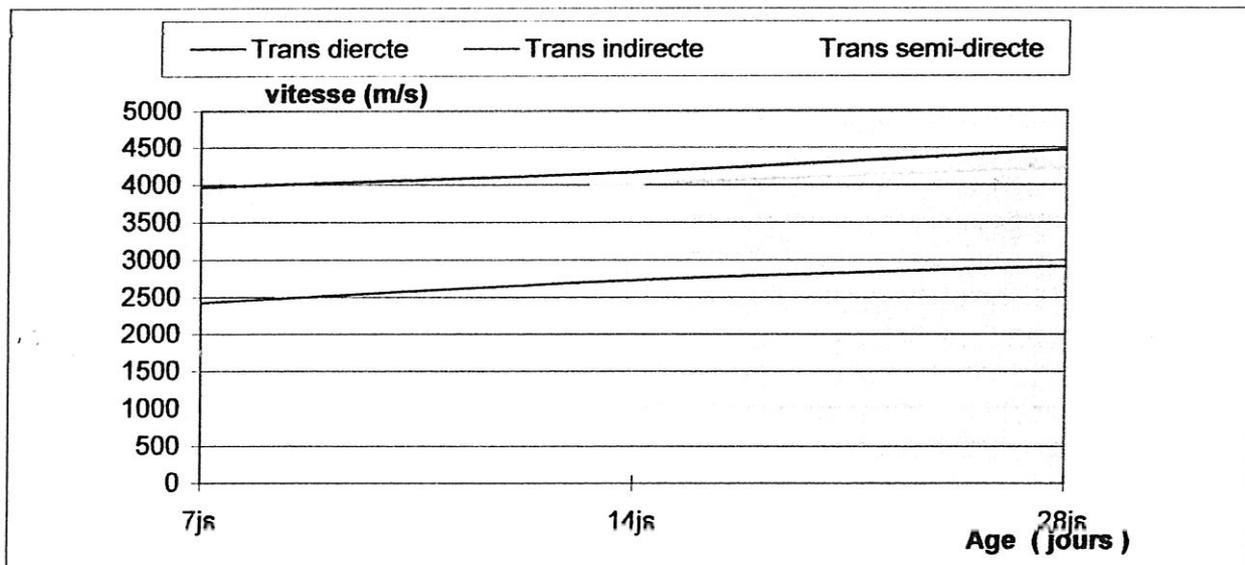


Figure AI.1 Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B1

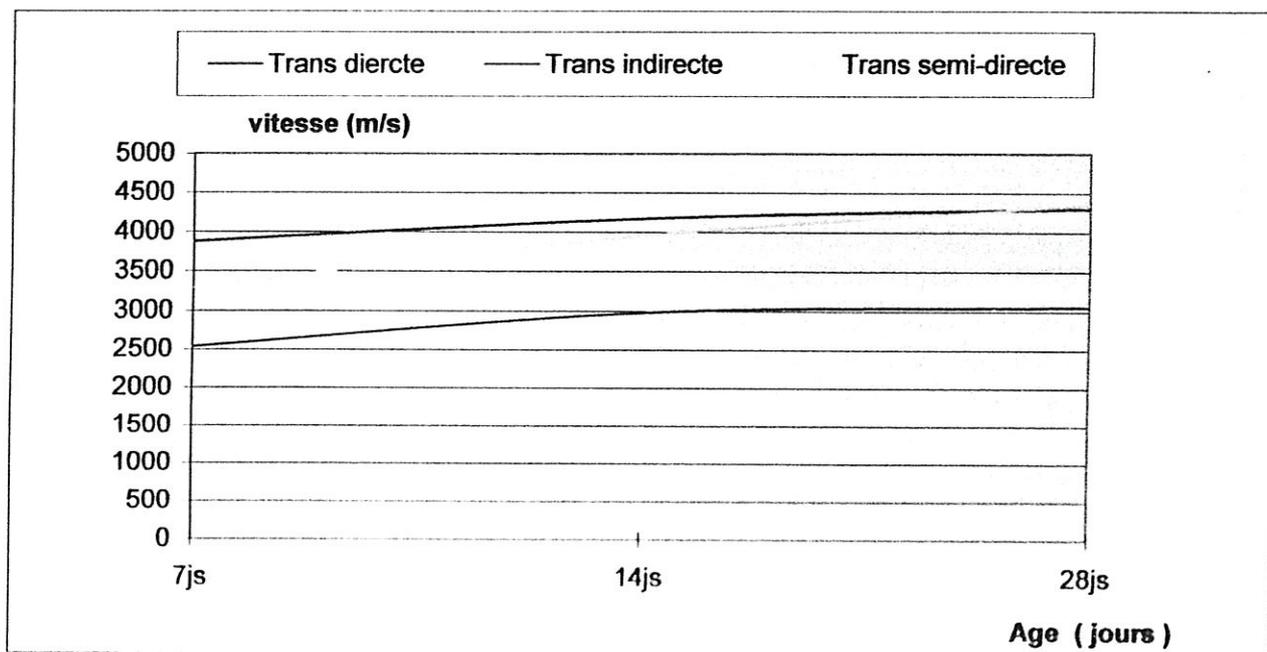


Figure AI.2 Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B2

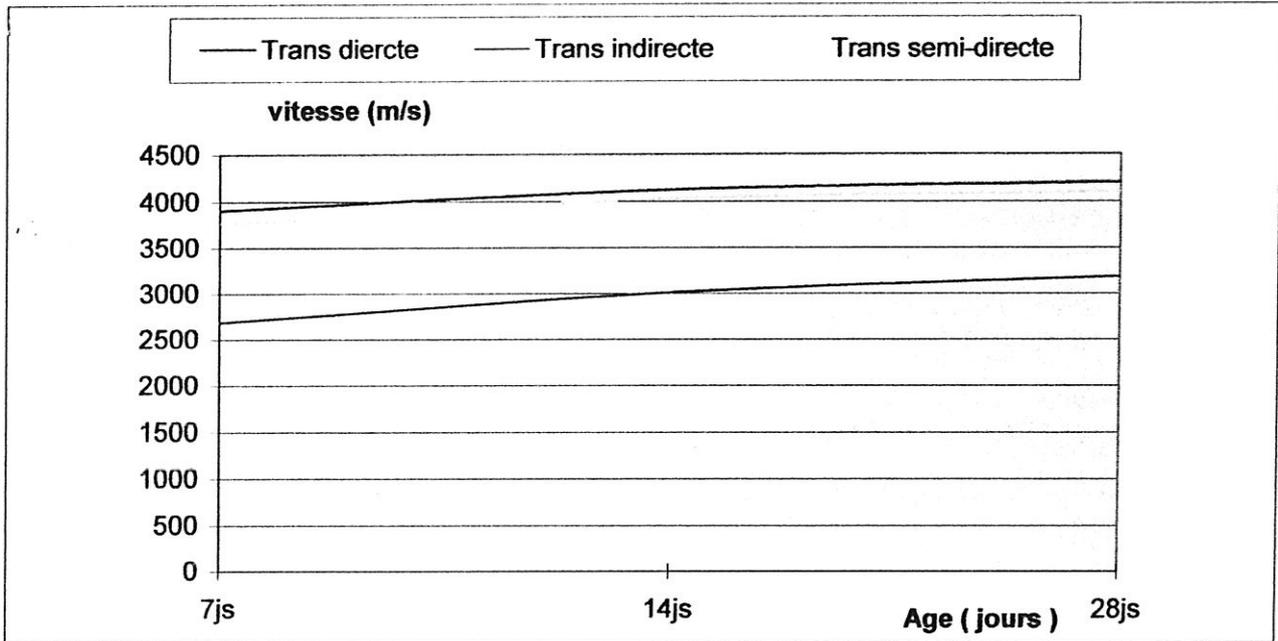


Figure AI.3 Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B3

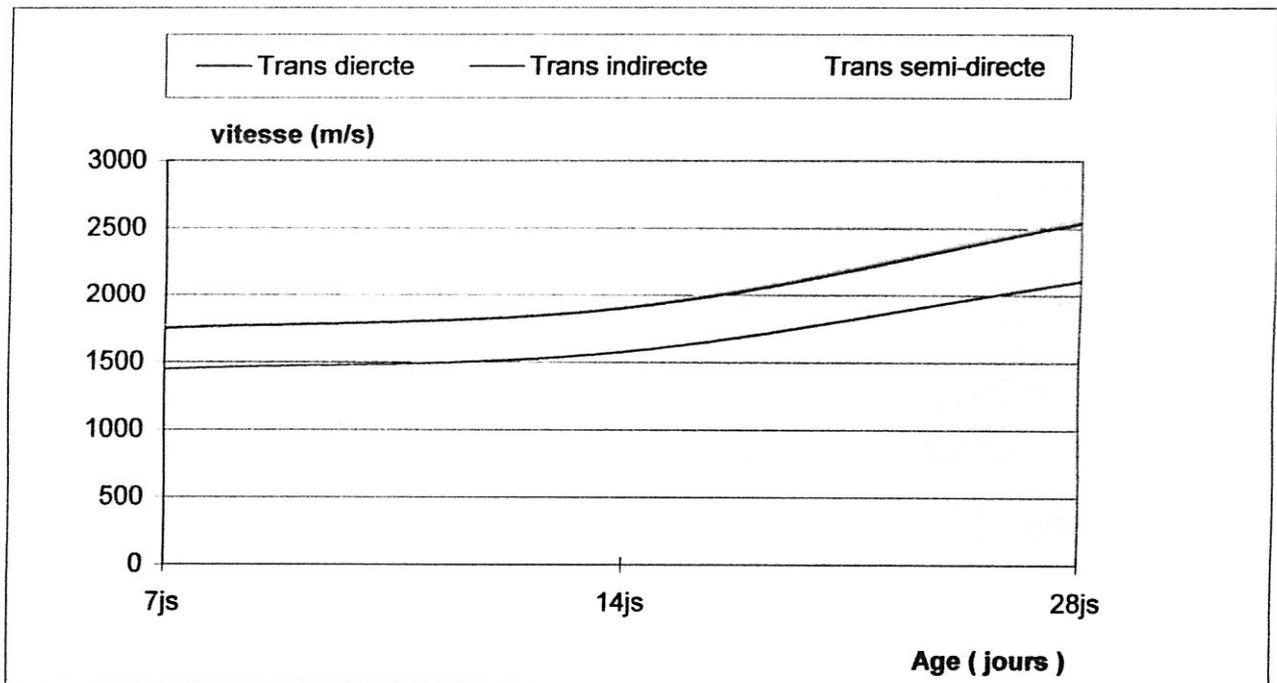


Figure AI.4 Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B4

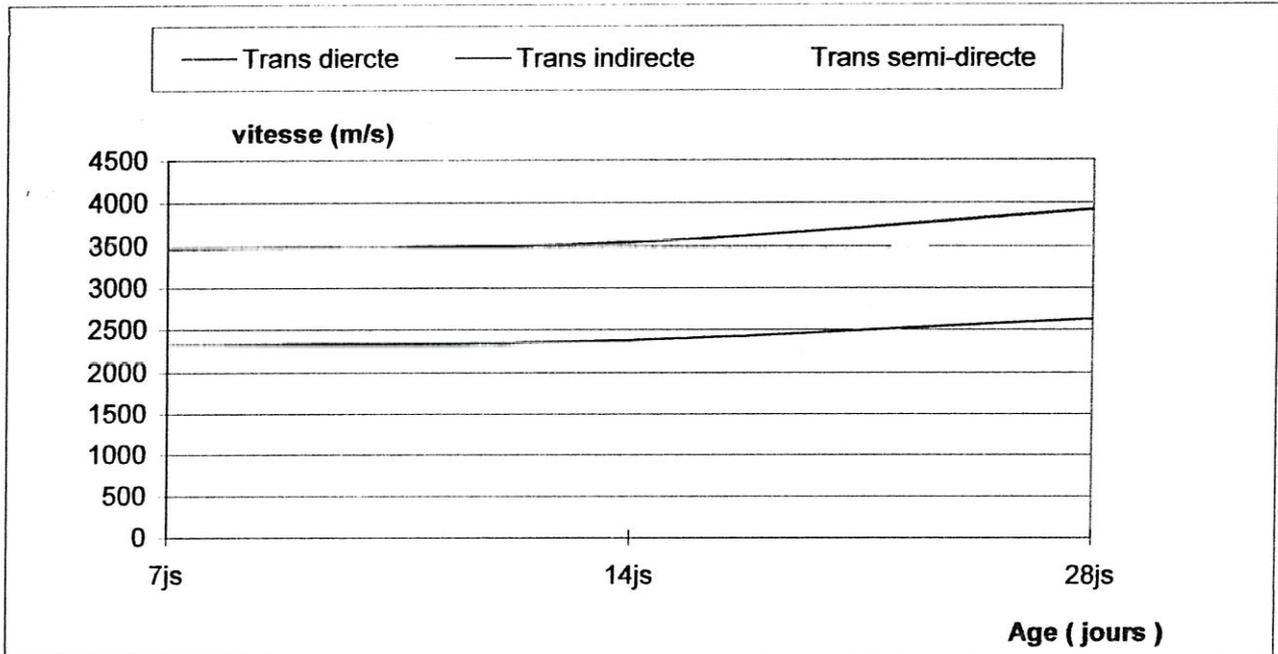


Figure AI.5 Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B5

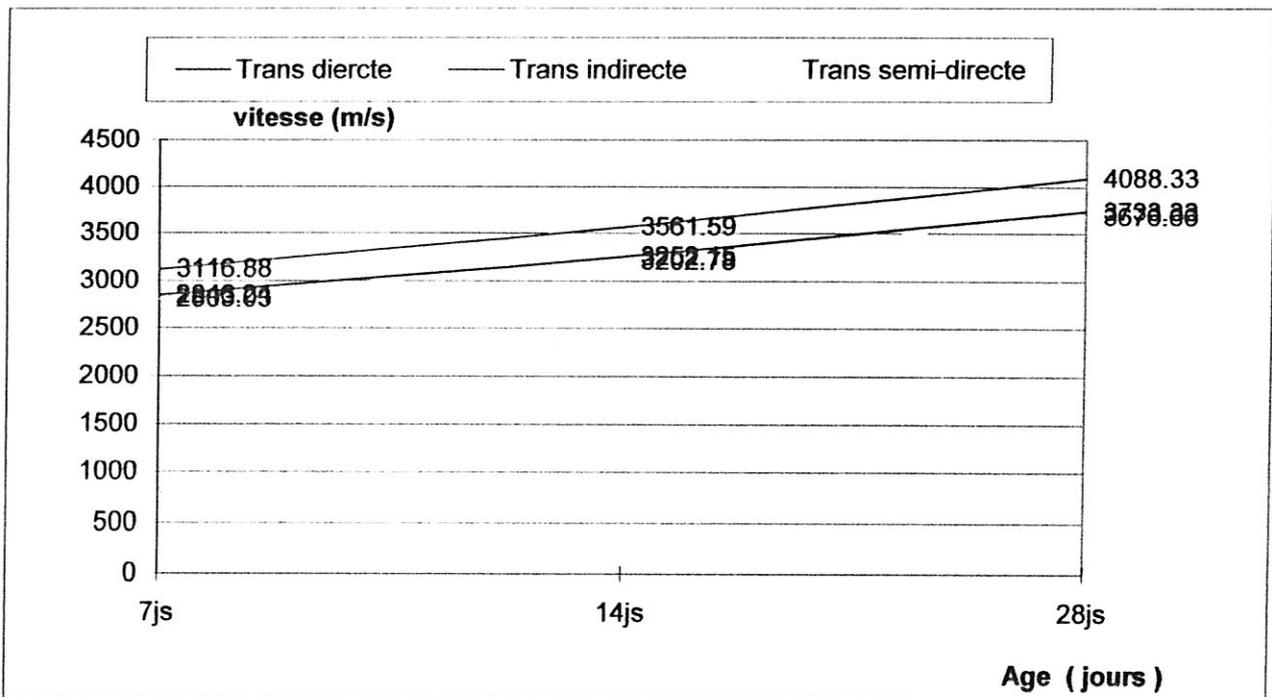
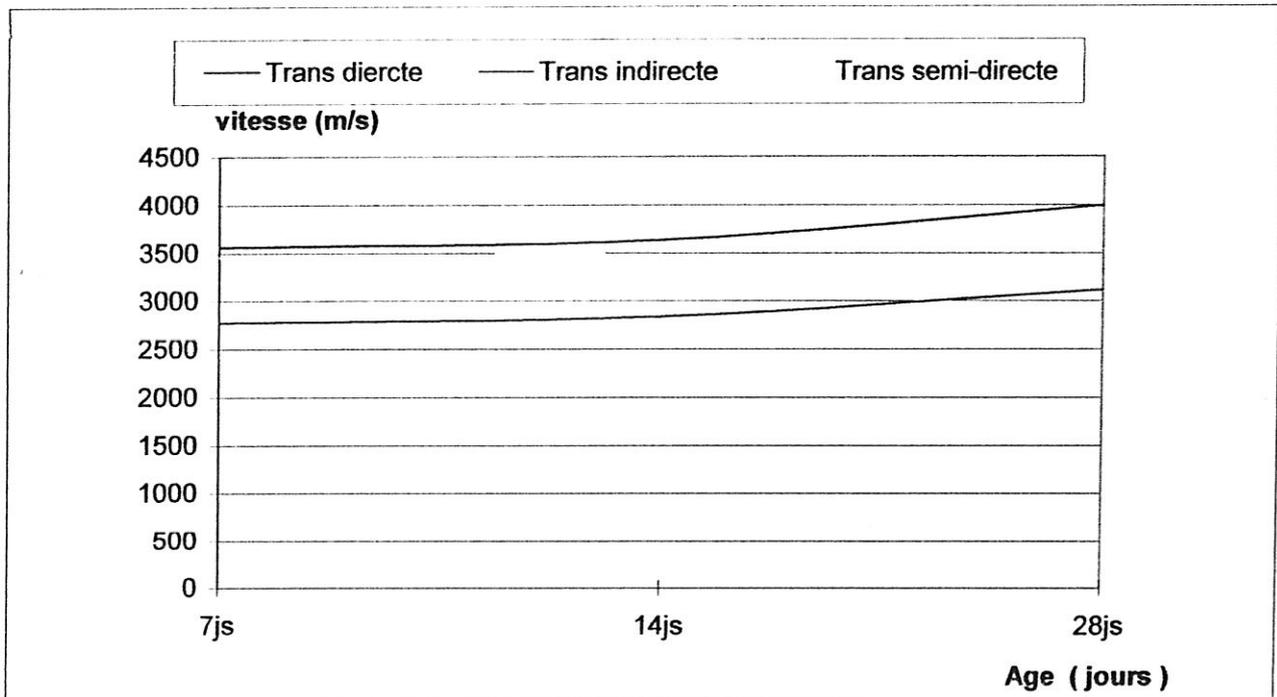
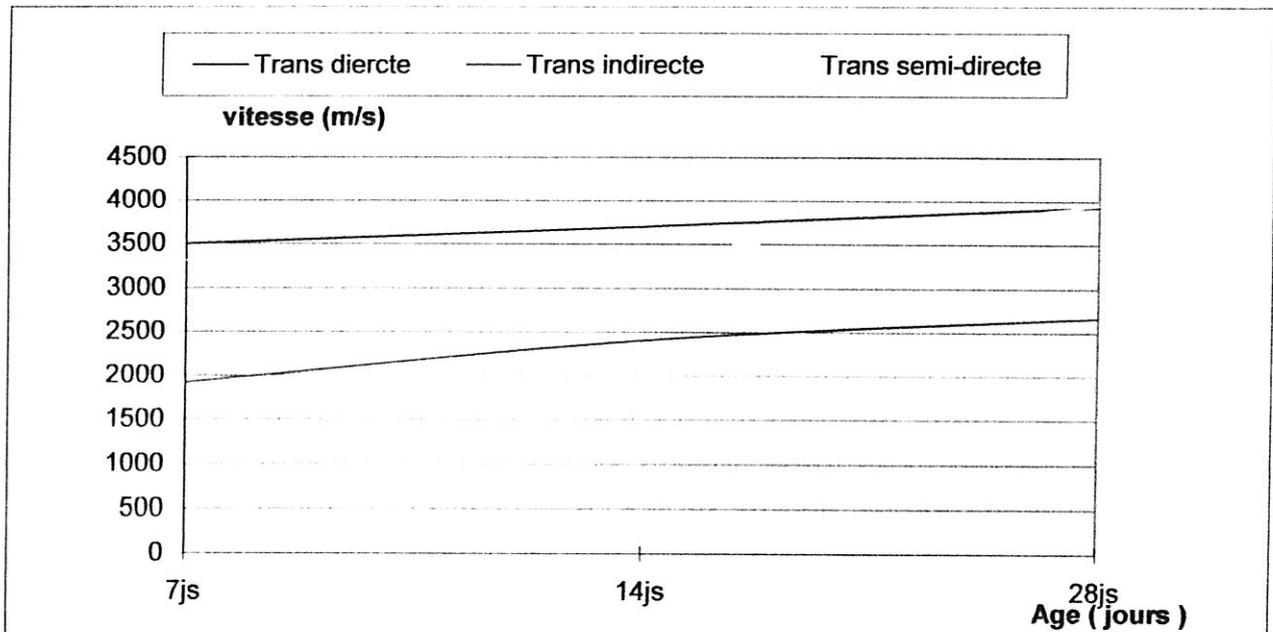


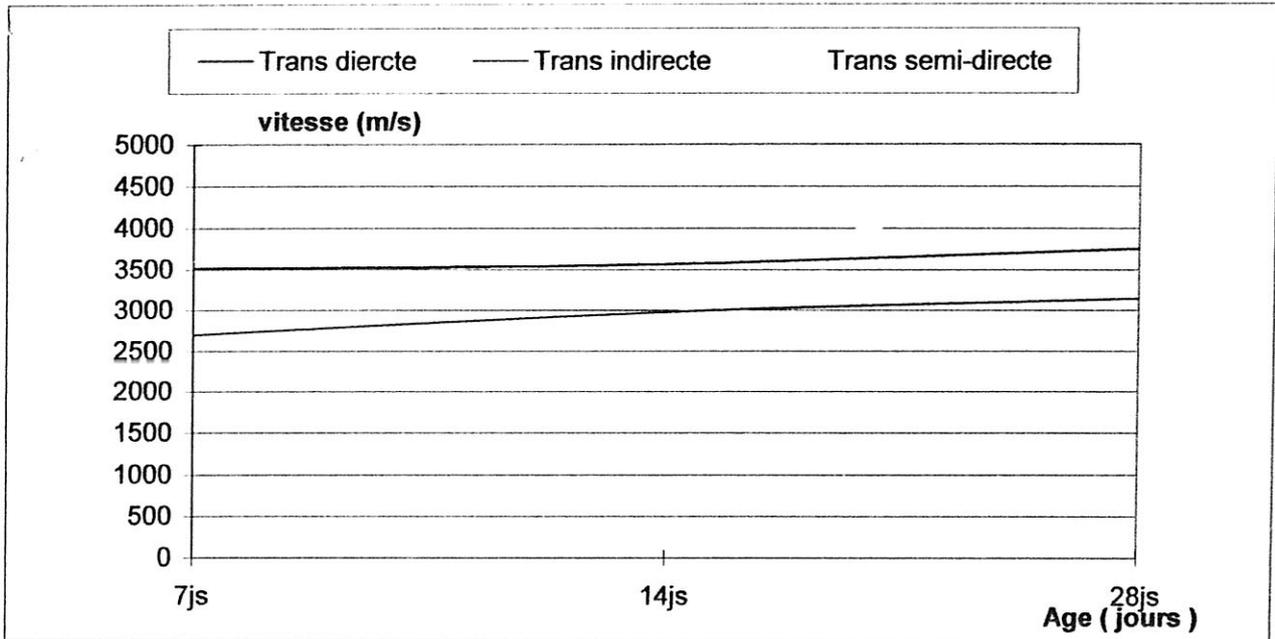
Figure AI.6 Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B6



**Figure AI.7** Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B7



**Figure AI.8** Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B8



**Figure AI.9** Influence de la nature de transmission sur les vitesses de ultrasons pour le béton B9

# ANNEXE II

## Variation du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons

Les résultats obtenus dans cette partie sont regroupés dans les tableaux A II.1 et représentés sur les figures qui suivent

*Tableaux AII.1: Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse du son*

## Béton B1

Vitesse( m/s)	0	3965.66	4164.25	4463.00
Ed (Mpa)	0	34639.83	38114.50	44003.00

## Béton B2

Vitesse( m/s)	0	3874.16	4169.00	4299.50
Ed (Mpa)	0	33215.33	38358.42	40791.03

## Béton B3

Vitesse( m/s)	0	3905.50	4129.25	4205.50
Ed (Mpa)	0	33454.33	37314.12	38694.00

## Béton B4

Vitesse( m/s)	0	1742.38	1896.74	2538.33
Ed (Mpa)	0	6708.14	8020.52	14373.25

## Béton B5

Vitesse( m/s)	0	3461.92	3543.26	3915.82
Ed (Mpa)	0	27070.72	28357.75	34648.20

## Béton B6

Vitesse( m/s)	0	2846.24	3252.15	3733.33
Ed (Mpa)	0	16449.25	21475.59	29316.33

## Béton B7

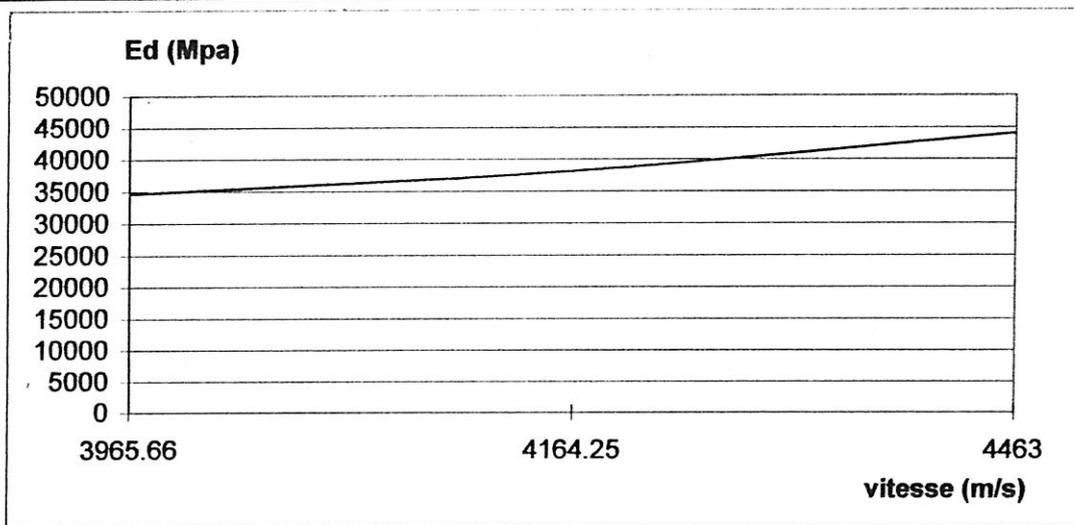
Vitesse( m/s)	0	3561.73	3639.28	3993.33
Ed (Mpa)	0	28822.42	30091.26	36400.66

## Béton B8

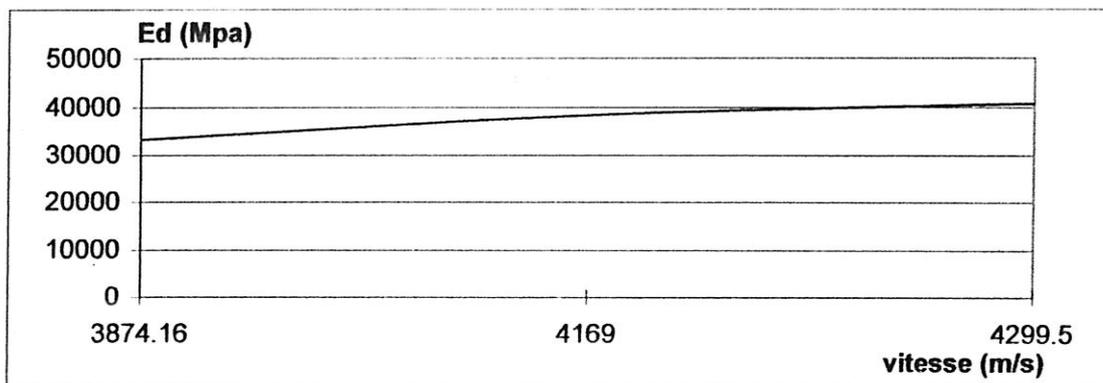
Vitesse( m/s)	0	3496.66	3697.60	3931.00
Ed (Mpa)	0	27329.66	30582.60	34527.00

## Béton B9

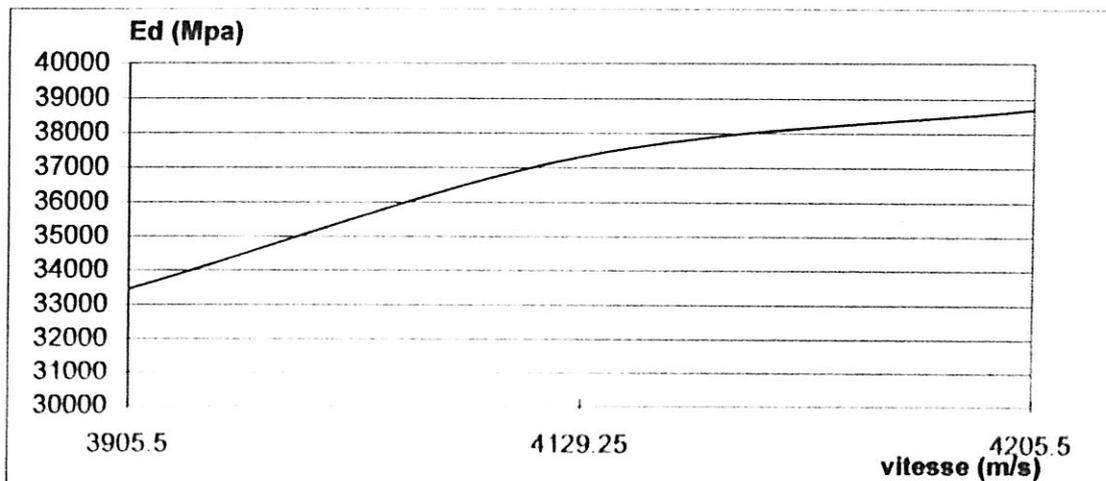
Vitesse( m/s)	0	3512.33	3564.50	3752.00
Ed (Mpa)	0	27537.50	28427.00	31407.00



**Figure AII.1** : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B1



**Figure AII.2** : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B2



**Figure AII.3** : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B3

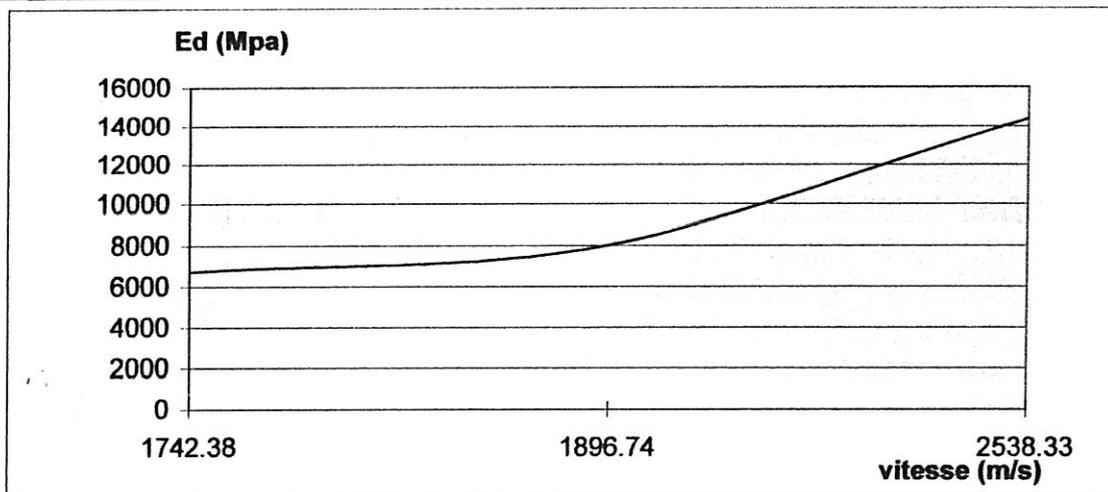


Figure AII.4 : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B4

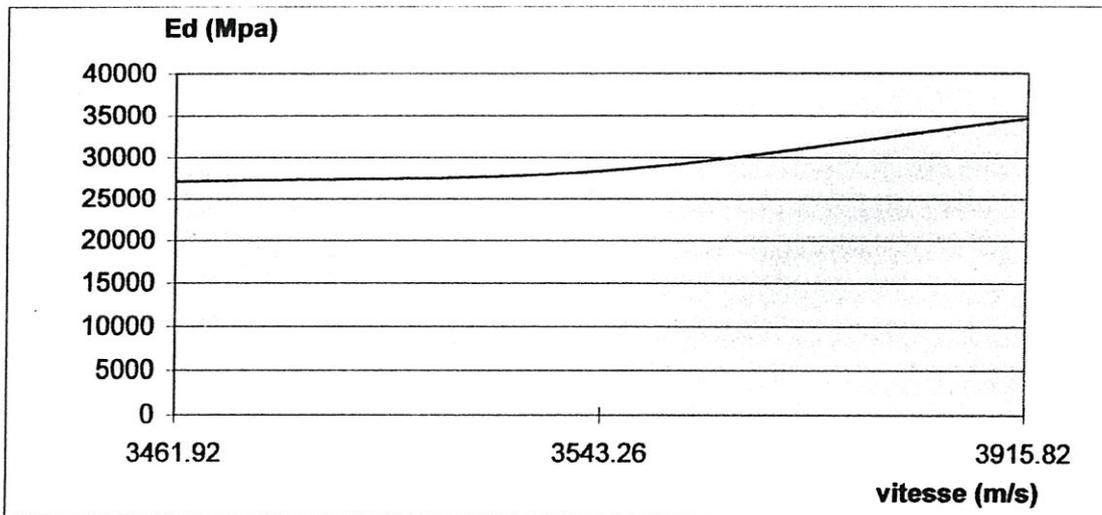


Figure AII.5 : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B5

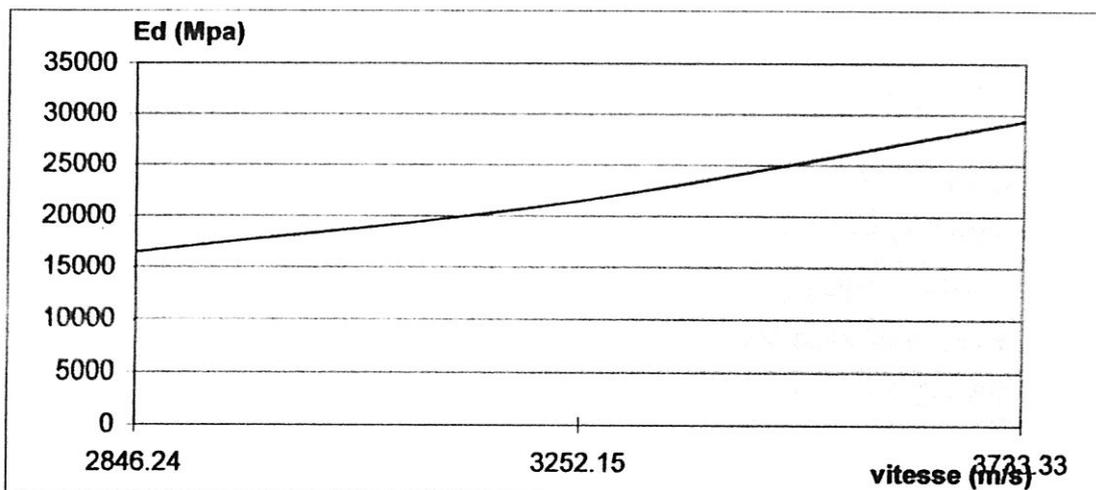


Figure AII.6 : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B6

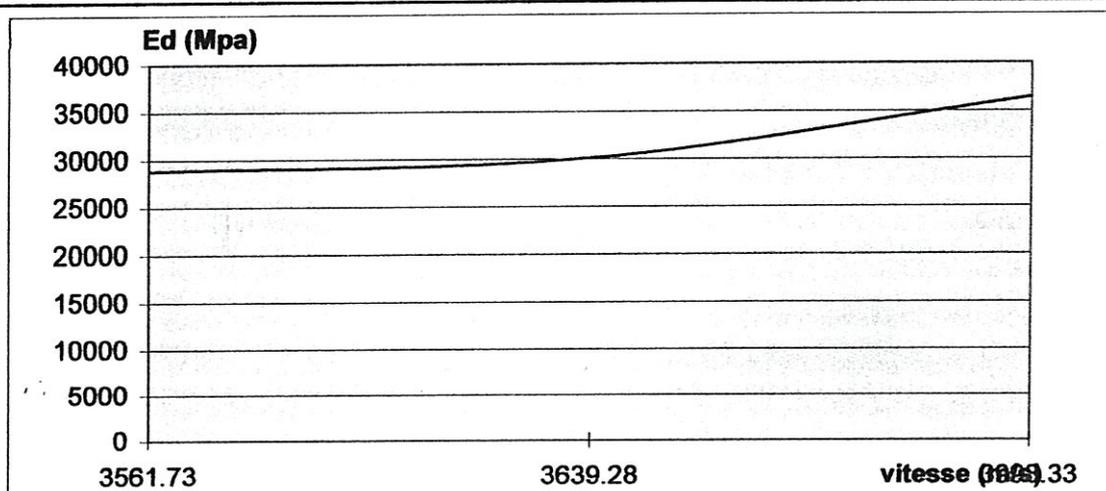


Figure AII.7 : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B7

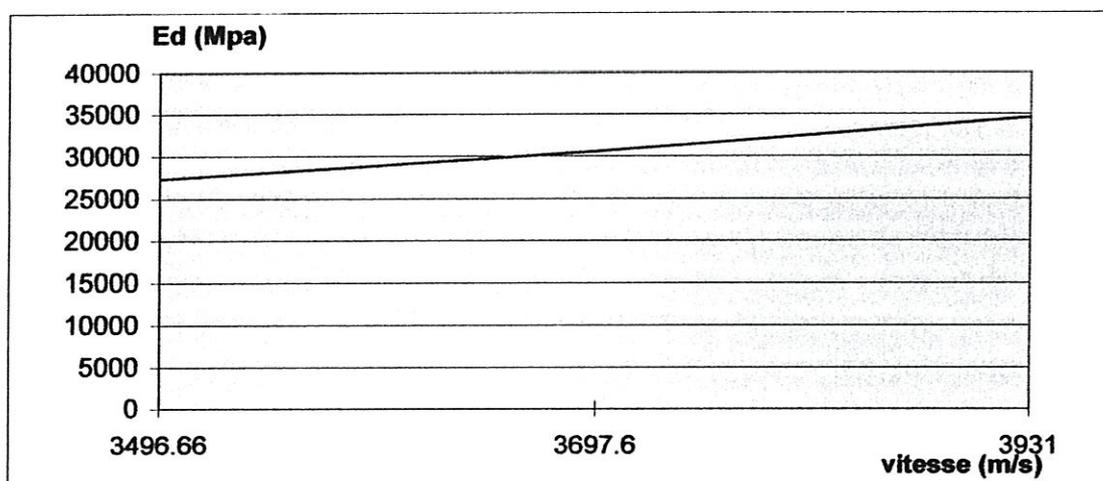


Figure AII.8 : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B8

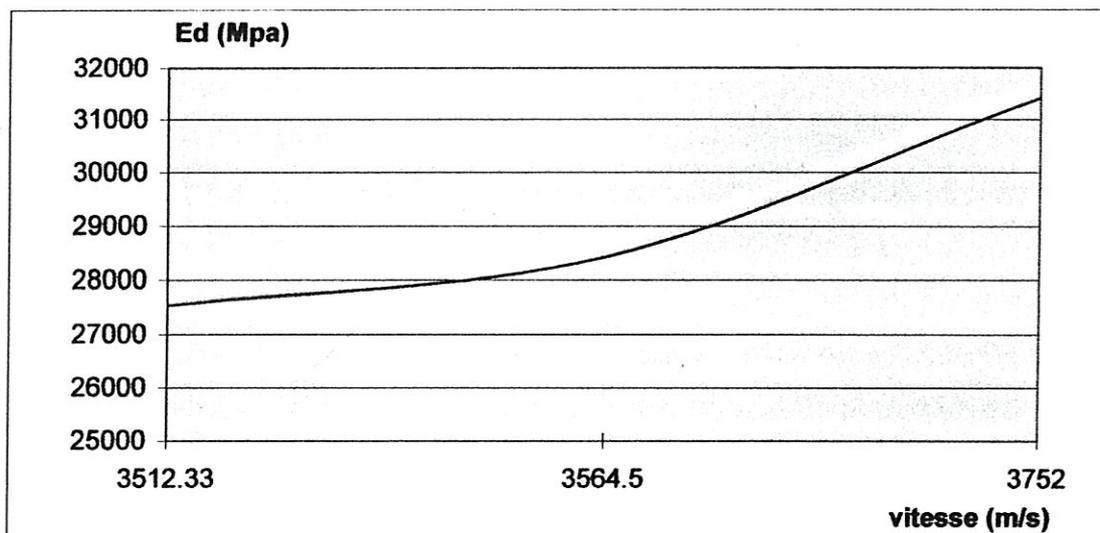


Figure AII.9 : Evolution du module dynamique en fonction de la vitesse des ultrasons pour le béton B9