

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



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

Mr. DAOUADJI Hacene

Mr. GHECILE Kouceila

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2en :**

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Contrôle non – destructif d'éprouvettes en compression par ondeleates

Devant le jury composé de :

Ait Tahar Kamel	MCB	UAMOB	Président
Arbaoui Ahcene	MCB	UAMOB	Encadreur
Aribi Chouaib	MCB	UAMOB	Examineur
Mohamedi Sadika	MCB	UAMOB	Co promoteurs
Boumaiza Malika	MCB	UAMOB	Co promoteurs

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord mon encadreur, Monsieur Mr Arbaoui Ahcene, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses notes et sa bienveillance.

On voudrait également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

On tient aussi à remercier les ingénieurs responsables de laboratoire matériaux de notre faculté et les responsables de CTP pour leurs aides et disponibilité.

Nos vifs remerciements à tous mes enseignant(e)s, en signe d'un grand respect et nos profond amour!!!

Merci à vous tous

Dédicace

À mes parents.

À mon petit frère

À mes beaux-parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

À tous les étudiants de la promotion 2018/2019

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

GHECIL Kouceila

Dédicace

À mes parents.

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À mes beaux-parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

À tous les étudiants de la promotion 2018/2019

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

Daouadji Hacene

Résumé

L'utilisation accrue des méthodes basées sur le contrôle non-destructif des ouvrages en béton armé est avérée ces derniers temps.

Le contrôle non-destructif des ouvrages est un contrôle à postériori comme le prélèvement d'échantillons par carottage ou contrôle par scléromètre néanmoins l'utilisation de l'ultrason s'avère plus efficace car non seulement on fait l'acquisition de la vitesse de propagation du signal qui nous permettra d'être informé sur la qualité du béton (contrainte limite) mais aussi beaucoup d'informations peuvent être tirées de l'étude du signal avec des méthodes et logiciels appropriées. Ces informations nous renseignent sur l'apparition de défauts (fissure, ségrégation, mauvais dosage) et en différents points de l'ouvrage, une base de données sera construite et à la base de ces informations cela nous permettra de contrôler les ouvrages à moindre coût à l'avenir et au temps réel.

Mots Clés : auscultation des structures, ultrason, contrôle non-destructif, défauts construction

الملخص:

تم إثبات الاستخدام المتزايد للطرق المعتمدة على الاختبارات غير المدمرة للهياكل الخرسانية المسلحة في الآونة الأخيرة.

المراقبة غير المدمرة للهياكل هو عنصر تحكم خلفي مثل أخذ العينات عن طريق الحفر أو التحكم عن طريق مقياس التصلب، ومع ذلك فإن استخدام الموجات فوق الصوتية يثبت أنه أكثر فعالية لأن ليس هناك واحد فقط يكتسب سرعة الانتشار إشارة من شأنها أن تتيح لنا معرفة نوعية ملموسة (الحد من القيود) ولكن أيضا الكثير من المعلومات يمكن استخلاصها من دراسات الإشارة مع الأساليب والبرمجيات المناسبة. هذه المعلومات تعلمنا عن ظهور العيوب (الكراك، الفصل) وفي نقاط مختلفة من الكتاب، سيتم بناء قاعدة بيانات وعلى أساس هذه المعلومات سوف تسمح لنا بالتحكم في الأعمال بتكلفة أقل في المستقبل وفي الوقت الحقيقي.

الكلمات المفتاحية: التسمع الإنشائي، الموجات فوق الصوتية، الاختبارات غير المدمرة، عيوب البناء.

Absract

The increasing use of multiple methods on non-destructive testing of reinforced concrete structures has recently been demontlated .

Non destructive control of structures is a black control, for exemple, sampling by drilling or controlling by sclerometer.

However, the use of ultrasound proved to be more effective because these is not only one gaining speed of spread that will allow us to know the concrete quality (limitation of constraints) but also a lot of information can be learned from the study of the signal with the appropriate methods and software this information informs us about the appearance of defects (krack, separation, bad dose).

At various points in the book, a data base will be built and these information will allow us to control the work at a lower cost in the future and in real time.

Key words : Structural auscultation, ultrasound, non destructive, tests, construction defects.

Table des matières

Introduction générale :	1
--------------------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur béton

I.1. Introduction :.....	2
I.2 Historique sur béton :.....	2
I.3 Définition de béton ordinaire :.....	2
I.4 Les composants du béton	3
I.4.1 Le ciment :	4
I.4.2 L'eau :	4
I.4.3 Les granulats :.....	5
I.5 Formulation du béton :.....	7
I.5.1 Les méthodes de formulation du béton.....	7
I.5.2 Méthode de FAURY :.....	8
I.6 Les essais de caractérisation sur béton :	9
I.6.1 Mode opératoire de malaxage :.....	9
I.6.2 Confection des éprouvettes :.....	9
I.6.3 Mesure de la maniabilité (durabilité) :.....	10
I.6.3.1 Equipement nécessaire :.....	11
I.6.3.2 Conduite de l'essai :.....	11
I.6.4 Essais de compression :	12
I.6.5 Essais de traction simple :.....	13
I.6.6 Essai de traction directe [28] :	13
I.6.7 Essais non destructif par ultrason :	14
I.7 Les essais de caractérisation sur granulats :.....	15
I.7.1 Essai d'équivalent de sable:(NF P 18-598) :.....	15

I.7.2 Essai micro-Deval :.....	16
I.8 Les avantages et inconvénients du béton :.....	18
I.9 Conclusion :	19

Chapitre II: Les types des bétons qui existe et leurs caractérisations

II.1. Introduction :	20
II.2 Le béton léger :.....	20
II.2.1 Caractéristique :.....	20
II.2.2 Application :	21
II. 3 Le béton auto-plaçant :	21
II.3.1 Caractéristiques du BAP :.....	21
II.3.2 Application de BAP :.....	21
II.4 Le béton fibré :	21
II.4.1 Caractéristiques du béton fibré :.....	22
II.4.2 Application :	23
II.5 Le béton sablé :.....	24
II.5.1 Application de béton sablé :	25
II.6 Le béton désactivé :	25
II.6.1 Caractéristiques du béton désactivé :.....	26
II.7 Les bétons hauts performances :.....	26
II.7.1 Les Avantages de BHP :.....	26
II.7.2 Durabilité :.....	26
II.8 Le béton lavé :	27
II.8.1 Caractéristiques du béton lavé.....	28
II.8.2Application du béton lavé :.....	28
II.9 Le béton bitumineux :.....	28
II.9.1 Les types de béton bitumineux :.....	29
II.9.2 Application du béton bitumineux :	30

II.10 Béton projeté :	30
II.10.1 Technique de projection :	30

Chapitre III: Les causes de dégradation du béton

III.1 Introduction :	32
III.2 Causes de dégradations internes (endogènes) :	32
III.2.1 Réaction alcali-granulat :	32
III.2.2 La réaction sulfatique interne :	32
III.2.2.1. Dégradation dus à la réaction sulfatique interne :	33
III.3 Causes de dégradations par des agents extérieurs (exogènes) :	33
III.3.1 Corrosion du béton armé due à la pénétration de O ₂ et H ₂ O :	33
III.3.1.1 Dé passivation des aciers par la carbonatation :	35
III.3.1.2 Vitesse de carbonatation :	36
III.3.1.3 Les principaux facteurs influant la carbonatation:	36
III.4. Action des agents agressifs sur le béton :	38
III.4.1 Actions des chlorures Cl ⁻ :	38
III.4.2 Actions de l'eau de mer :	39
III.4.3 Action des eaux agressives :	40
III.4.4 Actions de gel :	40
III.4.5 Actions des sels de déver glaçage :	41
III.4.6 Attaque due aux acides :	41
III.4.6.1 Attaque due au H ₂ SO ₄ :	41
III.4.7 Causes de dégradation dues à l'âge du béton :	45
III.4.8 Causes de dégradation physiques :	46
III.4.9 D'autres causes de dégradation :	46
III.5 Conclusion :	47

Chapitre IV: Les méthodes D'auscultation du béton

IV. 1 Introduction.....	48
IV.2. Méthodes D'essais	48
IV.3 Essai au scléromètre :.....	48
IV.3.1 Principe :	49
IV.3.2 Appareillage :.....	49
IV.3.3 Mode Opérateur :	50
IV.3.3.1 Préparation de la surface :.....	50
IV.3.3.2 Points de mesures.....	50
IV.3.4 Étalonnage de l'appareil.....	51
IV.3.5 Sur bloc en néoprène armé :.....	51
IV.3.6 Sur éprouvettes de béton	51
IV.3.7 Inconvénients de la méthode sclérométrique	52
IV.3.8 Les avantages.....	52
IV.4 Essai d'auscultation dynamique.....	52
IV.4.1 Principe	52
IV.4.2 Mode Opérateur	54
IV.4.2.1 Travaux préparatoires	54
IV.4.2.2 Points de mesures.....	54
IV.4.2.3 Distances minimales entre points de mesures.....	54
IV.4.2.4 Étalonnage de l'appareil.....	54
IV.4.2.5 Manières de mesure	55
IV.4.3 Définitions.....	56
57IV.4.5 Les avantages	58
IV.5 Essai par Carottage.....	58
IV.5.1 Facteurs influençant la résistance des carottes.....	60
IV.5.2 Diamètre.....	60
IV.5.3 Résistances	61

IV.5.4 Résistance potentielle.....	61
IV.6 Conclusion	62

Chapitre V: Caractérisation des matériaux utilisés et formulation de béton

V.1. Introduction	63
V.2 Le ciment.....	63
V.3 Les granulats :	63
V.3.1 Le sable :	63
V.3.1.1 Sable de Boussaâda	64
V.3.1.2 Sable de lamhir :.....	65
V.3.1.3 Correction de sable :.....	67
V.3.2 Le Gravier :	67
V.3.2.1 Gravier 3/8 de lemhir :	67
V.3.2.2 Gravier 8/15 de lemhir :	68
V.3.2.3 Gravier 15/25 de lemhir :	69
V.4 Formulation des bétons :	70
V.4.1 La courbe de référence :	70
V.4.2 Dosage eau	71
V.4.3 Dosage du ciment :	71
V.4.4 Pourcentage des grains dans le graphe :.....	72
V.4.5 Le rapport E/C:.....	72
V.4.6 Le rapport G/S :.....	73
V.4.7 Courbe granulométrique selon FAURY :.....	73
V.5. Conclusion	73

Chapitre IV: Partie expérimentale

VI.1 Essais de compression :.....	74
V.I.2 Control non destructive :.....	76
VI.2.1 Le 1er cas l'éprouvette à vide	75

VI.2.2 le 2eme cas :après chargement de l'éprouvette	77
VI.2.3 Le 3eme cas après la rupture de l'éprouvette à 28.73	80
Conclusion générale	82

Reference

Annexe

Liste des figures

Figure I.1: Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.	4
Figure I.2: Influence du dosage d'eau sur la rhéologie.	6
Figure I.3 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire.	8
Figure I.4 : éprouvette de béton ($\Phi=16$ cm, $h=32$ cm) dans un milieu humide.	11
Figure I.5 : cône d'abrams.	12
Figure I.6 : Essai de compression.	13
Figure I.7 : Dispositifs pour établir un essai de traction.	14
Figure I.8 : Géométrie d'un disque dans le cadre d'un essai brésilien	15
Figure I.9: Etudes de signales d'une éprouvette cubique par le CND	15
Figure I.10: Essai équivalent de sable.	16
Figure I.11 : Appareille micro-Deval.	18
Figure I.12 : Essai los angles.	18
Figure II.1: Béton léger	20
Figure II.2 : Coulage de béton sablé.	24
Figure II.3 : Terrasse en béton désactive.	25
Figure II.4 : Voie en béton lavé.	27
Figure II.5: Sol en béton bitumineux.	29
Figure III.1: Réunion des facteurs de la corrosion	34
Figure III.2 : Processus électrochimique de la corrosion des armatures par	35
Figure III.3 : Processus de carbonatation	37
Figure III.4 : Processus général de carbonatation	38
Figure III.5 : Pénétration des ions chlorures et initiation de corrosion	39
Figure 6: Action de gel	41
Figure III.7: Evolutions de dégradation des éprouvettes en mortier de ciment dans des milieux acides à différentes concentration	43
Figure III.8: Canalisation dégradée.	44
Figure III.9: microscopiques de C3A et d'étringite.	45

Figure IV.1: Original Schmidt type N/L	49
Figure IV.2: Grille de mesure sur ouvrage	50
Figure IV.3: Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil	52
Figure IV.4: appareille de mesure.....	53
Figure IV.5: appareille d'auscultation soniques 58-E48 avec oscilloscope	54
Figure IV.6: étalonnage de l'appareille	55
Figure IV.7: Mesures en transparence (directe)	56
Figure IV.8: mesure en surface (indirecte)	56
Figure IV.9: Mesures semi directe.....	57
Figure IV.10: Ondes acoustiques.....	57
Figure IV.11: courbes de calibrages	58
Figure IV.12: Carottage électrique à la couronne diamantée de 20 à 110 mm de diamètre ...	60
Figure V.1 : Tamis de système de vibration.....	65
Figure V.2: courbe granulométrique selon FAURY	73
Figure VI.1 : Courbe de contrainte fonction de temps.....	74
Figure VI.2: Appareille pundit L200.	75
Figure VI.3 : Signal longitudinal à vie.....	75
Figure VI. 4: Signal transversale à vide.....	76
Figure VI.5 : La transformé de Fourier pour le 1er cas (épreuve à vide).....	77
Figure VI.6 : Signal à 11 MPA.....	77
Figure VI.7 : Signal à 20 MPA.....	78
Figure VI.8 : Signal à 24 MPA.....	78
Figure VI.9 : Signal à 28 MPA.....	79
Figure VI.10 : La transformé de Fourier pour l'éprouvette avec une variation de charge de 9 MPA à 28 MPA.....	79
Figure VI.11 : Signale à la rupture 28.73	80
Figure VI.12: Fonction FFt du premier signal à la rupture.....	81

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1</i> : La procédure d'essai est décrite dans la norme NFP 18-45 1	10
<i>Tableau I.2</i> : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.	16
<i>Tableau II.1</i> : Les familles de fibre	23
<i>Tableau III.1</i> : Composition ionique de la mer méditerranéenne	44
<i>Tableau V.1</i> : Caractéristiques physiques.....	65
<i>Tableau V.2</i> : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.	66
<i>Tableau V.3</i> : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.	67
<i>Tableau V.4</i> : Caractéristiques physiques.....	67
<i>Tableau V.5</i> : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.	69
<i>Tableau V.6</i> : Caractéristiques physiques.....	69
<i>Tableau V.7</i> : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.	70
<i>Tableau V.8</i> : Caractéristiques physiques.....	70
<i>Tableau V.9</i> : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.	71
<i>Tableau V.10</i> : Composition d'un mètre cube de béton.....	74

Introduction générale

Le béton est un matériau essentiel en génie - civil est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement, d'écoles, d'hôpitaux et d'infrastructures.

A la fois robuste et universel, l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, et sa formulation, jusqu'aujourd'hui très empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la science des matériaux.

Le béton est un matériau qu'on formule et donc parfois des erreurs de formulation qui peuvent altérer ses qualités.

Les conditions d'exploitation peuvent engendrer des problèmes de fissuration et de concentration de contraintes et par là des défauts qui peuvent à la longue diminuer sa durée de vie.

Les méthodes d'auscultation sont les méthodes destructives et les contrôles non-destructifs, dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation de l'ultrason qui génère des signaux le long de l'échantillon et au travers et avec l'étude des signaux on s'informe sur l'état physique du matériau à n'importe quel moment.

Chapitre I

Généralité sur béton

I.1. Introduction

Le béton est un mélange de plusieurs composants (ciment, sable, gravier, eau et les adjuvant) très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes [Georges Dreux, Jean Festa, 1998]. Ce matériau présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants. [1]

I.2 Historique sur béton

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème}, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teilen France en 1830 préparent l'avènement du béton. [2].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel. [3]

I.3 Définition de béton ordinaire

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base : ciment, granulats, eau, avec un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée.

Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre :

$$20 \text{ MPa} = f_{c28} = 50 \text{ MPa.}$$

I.4 Les composants du béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier (figure1), qui constitue un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 μ m (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [4].

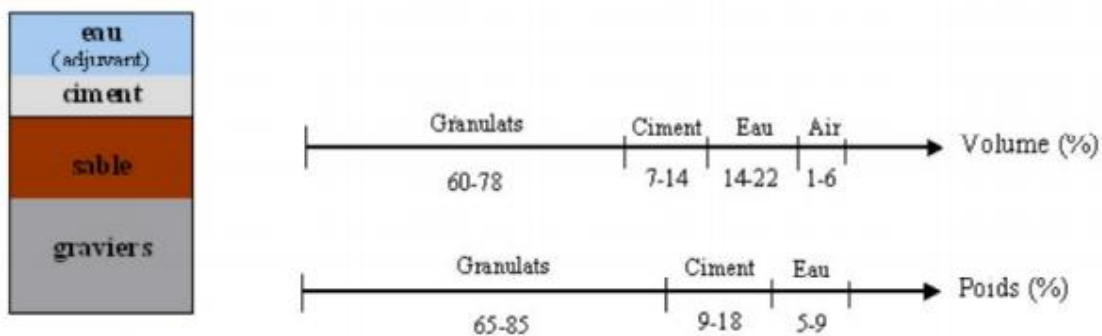


Figure 1.1: Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [4].

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants. Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton. L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de super plastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à atteindre une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange [5].

I.4.1 Le ciment

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. C'est un liant hydraulique à la base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu [6]. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant d'accélérer pendant la phase de prise. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, ciments les plus utilisés sont les CEM II de classe 32,5– 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Ce sont des ciments bien adaptés aux usages les plus courants du bâtiment, dans les environnements 1 et 2 au sens de la norme P 18-305 [7]. Ont montré que le dosage en ciment a un effet sur la viscosité du béton pour un gradient de petite vitesse.

I.4.2 L'eau

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : Une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire: une meilleure résistance obtenue.

En réduisant la quantité d'eau en augmenter la résistance et pour une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle. Le rapport E/C est un critère important des études de béton; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances: résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribué épale réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [8], a permis de préciser quelles conditions une eau est utilisable.

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. Un ajout d'eau conduit également à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la figure 2.

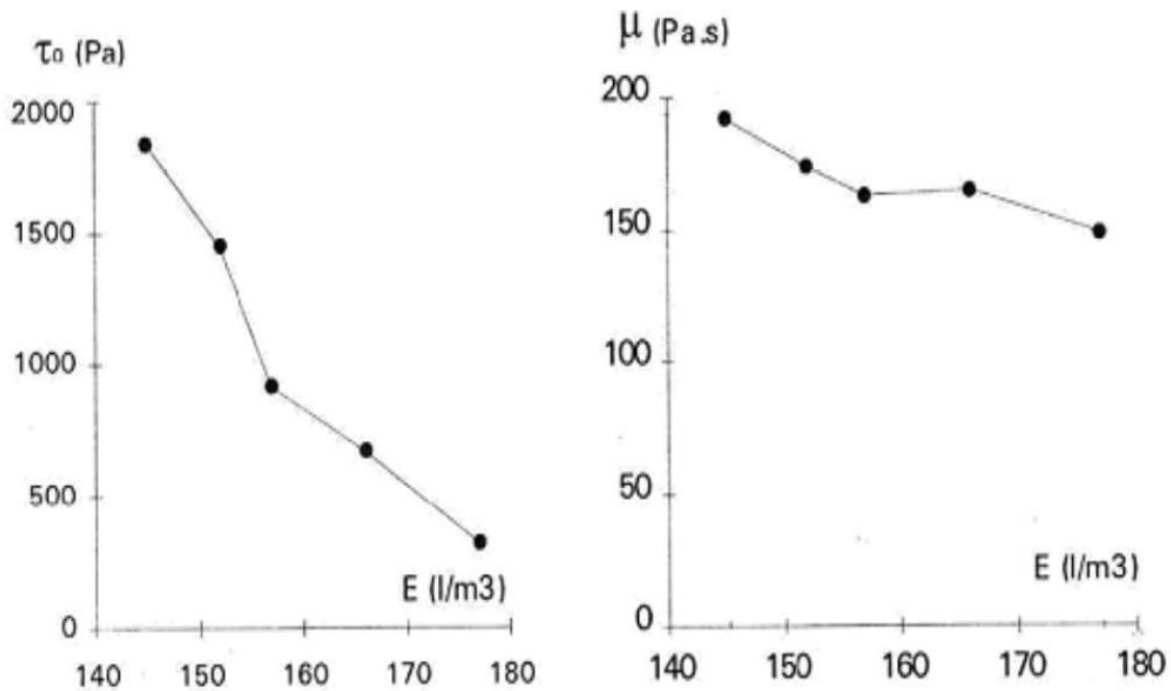


Figure I.2: Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [9].

μ : la viscosité plastique ; τ_0 : contrainte de cisaillement ; E : dosage en ea

I.4.3 Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases déroulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage,

criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité mise en œuvre. Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques.

On a constaté qu'un granulat peut paraître insatisfaisant sous certains aspects, alors qu'aucun problème n'a été détecté lorsqu'il a été utilisé dans le béton. Par exemple, une éprouvette de roche peut se rompre lorsqu'elle est soumise au gel, mais ne passe briser si elle est confinée dans du béton. Cela est d'autant plus vrai lorsque les granulats sont bien enrobés d'une pâte de ciment de faible perméabilité. Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton de qualité. Ceci dit, les essais sur les granulats sont d'une eau de précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons [10].

La phase granulaire résiste au cisaillement suivant un processus mécanique faisant intervenir l'enchevêtrement et les frottements des grains (loi de Coulomb) [11].

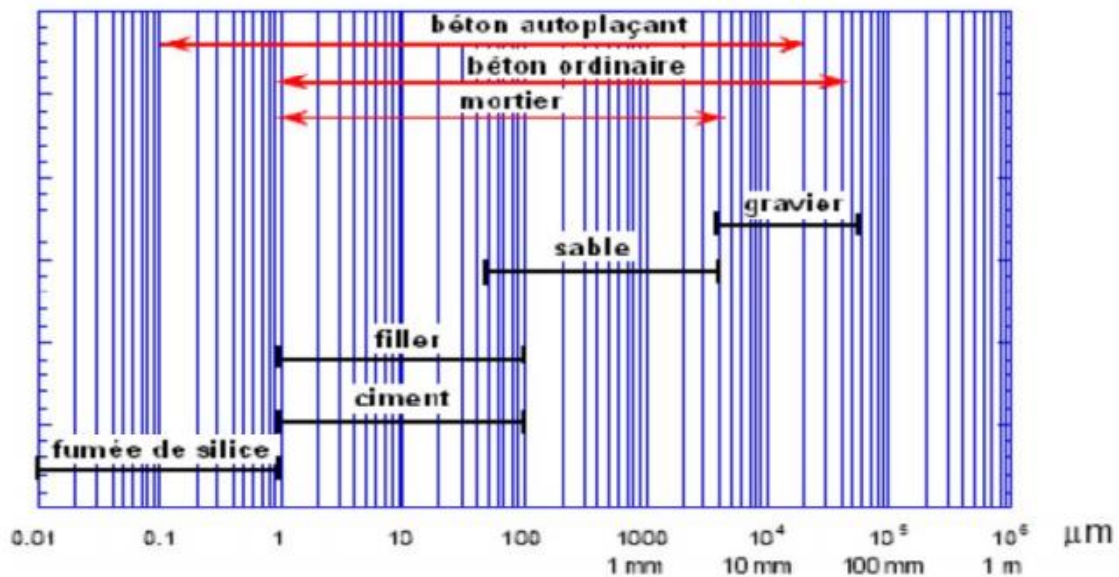


Figure I.3 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire[11].

I.5 Formulation du béton

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance) [1].

I.5.1 Les méthodes de formulation du béton

Dans la littérature on trouve plusieurs méthodes de composition de béton. On peut situer:

- Méthode de Bolomey ;
- Méthode de Faury ;
- Méthode d'Abrams ;
- Méthode de Vallette ;
- Méthode de Joisel ;
- Méthode Américaine ;
- Méthode Britannique ;
- Méthode de Dreux –Gorisse.

I.5.2 Méthode de FAURY

En 1942, J. FAURY proposa, comme suite à une étude générale du béton une nouvelle loi de granularité de type (continu).

Il s'inspirait pour cela de la théorie de Caquot, relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction $5d$; c'est pourquoi FAURY adopta une échelle des abscisses graduées en $5d$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant FAURY a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse $5d$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixe à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certain paramètre dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance de serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense) [1].

Cette valeur se calcule par la formule suivante : [12]

$$Y = A + 17^5 \sqrt{d} + B / (R/D - 0.75) \text{ mm.}$$

Où :

A : coefficient de nature des granulats (roulé ou concassé) il dépend de niveau de consistance de béton.

B : 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

R: rayon moyen du moule.

A partir de cette formule, on trace une courbe de référence.

I.6 Les essais de caractérisation sur béton

On distingue essentiellement dans la caractérisation sur béton des différents essais physiques comme l'essai de cône d'abîmes et les malaxages et confection des éprouvettes et les essais mécaniques à l'état durci l'éprouvette est détruite c'est l'essai non destructif comme le CND la suite duquel l'éprouvette n'est pas détruite l'essai destructif comme l'essai de compression et traction.

I.6.1 Mode opératoire de malaxage

La préparation du mélange a été faite en respectant soigneusement les démarches suivantes :

- Peser le sable, les granulats (lavés puis séchés) et le ciment.
- Introduction le sable, le ciment, et les graviers dans le malaxeur. Le tout est ensuite malaxé pendant 60 secondes.
- Introduire de l'eau puis malaxer pendant 40 secondes.
- Introduction du plastifiant pendant le malaxage qui dure 30 secondes.

I.6.2 Confection des éprouvettes

Les moules d'éprouvettes pour les essais de compression, sont des corps d'éprouvette de forme cylindrique de dimensions normalisés ($\Phi=16$ cm, $h=32$ cm). Le remplissage des moules se fait avec délicatesse particulièrement pour les éprouvettes de compression. Les moules remplis sont par la suite vibrés sur par un vibreur pour évacuer les bulles d'air et éviter les cavités dans le béton frais (augmente la compacité du béton).

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. Ils sont ensuite soumis, durant une semaine, à une cure humide dans l'eau jusqu'à l'âge de l'essai figure I.4.



Figure I.4 : éprouvette de béton ($\Phi=16$ cm, $h=32$ cm) dans un milieu humide.

I.6.3 Mesure de la maniabilité (durabilité)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas les 40mm.

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre.

Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Observation	A	Classe
Ferme	De 0 à 4cm	S1
Plastique	De 5 à 9cm	S2
Très plastique	De 10 à 15cm	S3
Fluide	Supérieur à 16cm	S4

Tableau I.1 : La procédure d'essai est décrite dans la norme NFP 18-45 1 [5].

I.6.3.1 Equipement nécessaire

L'appareille comme le montre la figure III.5 se compose de 4 éléments :

Un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, de 20cm de diamètre en sa partie

Inferieure et de 10cm de diamètre en sa partie inferieure ;

- Une plaque d'appui.
- Une tige de piquage.
- Un portique de mesure.

I.6.3.2 Conduite de l'essai

Pour mesurer l'affaissement on introduit le béton frais dès la fin de sa confection en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage. Araser le moule, démouler immédiatement en soulevant le moule. Après mesurer l'affaissement à partir du point le plus bas du béton.

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage, le résultat obtenu permet de classer les bétons [5].



Figure I.5 : cône d'abrams.

I.6.4 Essais de compression

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire sur une presse, Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions (éprouvettes cylindriques, cubiques).

L'essai consiste à placer les éprouvettes confectionnées entre les deux plateaux de la presse. Le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette étant fixe, le plateau supérieur est mobile.

En dévalant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau inférieur. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

L'essai de compression est ainsi achevé, la charge maximale P est donnée dès que la rupture est enclenchée, cette charge maximale servira à déterminer la résistance f_c qui s'obtient par le rapport P/S (éprouvette utilisé de forme cylindrique de dimensions normalisés ($\Phi=16$ cm, $h=32$ cm) [5].



Figure I.6 : Essai de compression.

I.6.5 Essais de traction simple

Il n'est pas aussi aisé de réaliser des essais de traction directe, que de compression, dans le cadre des éprouvettes évoquées par la norme NF 12390-1. C'est pour cela que la norme NF 12390 ne décrit pas d'essai de traction directe, mais seulement des essais dits indirects. La figure I.7 montre trois dispositifs utilisés pour établir un essai de traction. Ces derniers sont décrits plus en détails ici [13].

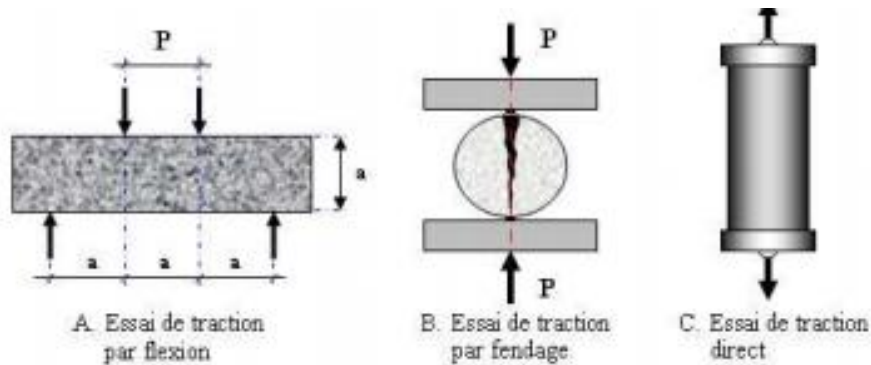


Figure I.7 : Dispositifs pour établir un essai de traction[27].

I.6.6 Essai de traction directe [28]

Cet essai permet de connaître la résistance en traction de l'éprouvette, tout comme pour l'essai en compression cette dernière est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. Une plaque est collée sur chacune des faces soumises au test, la plaque inférieure étant maintenue à l'aide d'un dispositif de bridage alors que la partie supérieure est tractée à l'aide d'une contreplaque munie d'une rotule. La difficulté de cet essai est le soin particulier que nécessite le collage de l'éprouvette afin d'être certain que la rupture se produise au sein de l'éprouvette et non dans au niveau du collage. C'est pour cette raison que cette essai est rarement pratiqué. Le CERIB recommande comme vitesse de chargement de prendre les même que pour les essais de flexion ou de fendage, c'est à dire : $\sigma \in [0,04; 0,06]$ MPa/s en contrainte imposée. La résistance en traction est obtenue directement à l'aide de la charge au moment de la rupture divisée par la section.

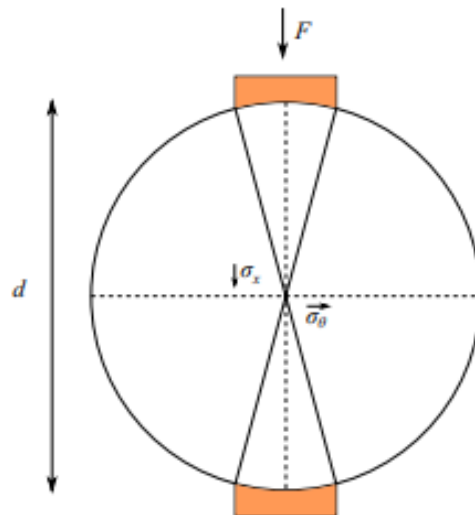


Figure I.8 : Géométrie d'un disque dans le cadre d'un essai brésilien [29]

I.6.7 Essais non destructif par ultrason

Ces essais permettent de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton.



Figure I.9: Etudes de signales d'une éprouvette cubique par le CND

I.7 Les essais de caractérisation sur granulats**I.7.1 Essai d'équivalent de sable:(NF P 18-598)**

Dans le cas des sables cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculant. Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes. Ensuite, on mesure la hauteur, dans l'éprouvette normalisée, du sédiment H1, et du sédiment + flocculat H2. Le résultat:

$$ESV = (H1/H2) \times 100, Es = (H'1/H2) \times 100$$

ES: équivalent de sable mesuré au piston.

ESV : équivalent de sable mesuré visuellement.

H1 : hauteur du sable propre seulement.

H'1 : hauteur du sable propre seulement au piston.

H2 : hauteur du sable propre et élément fins.

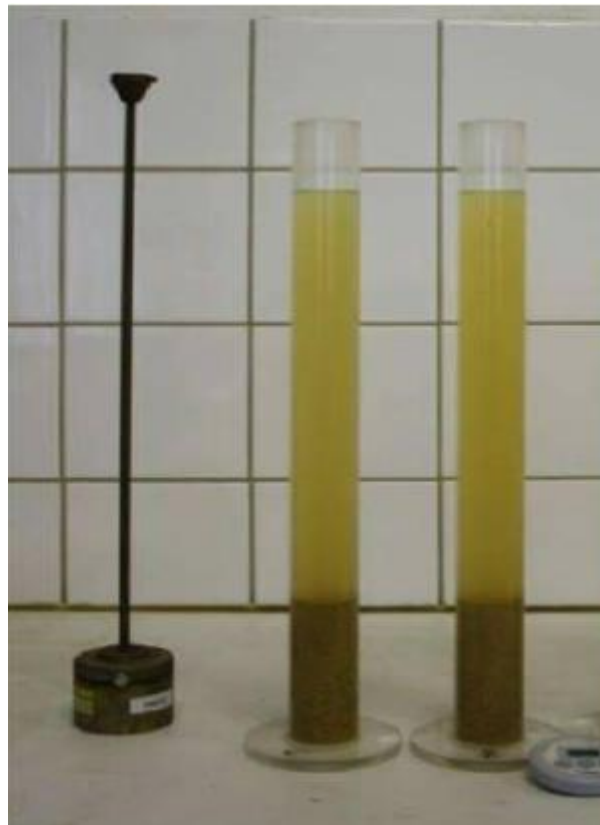


Figure I.10: Essai équivalent de sable.

ESv < 65	Esp < 60	Sable argileuse ; à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ESv < 75	60 ≤ Esp < 70	Sable légèrement argileux ; admissible pour des bétons de qualité courante.
75 ≤ ESv < 85	70 ≤ Esp < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuse ; convenant parfaitement pour des bétons de qualité.
ASv 85	Esp 80	Sable très propre : risque d'un défaut de plasticité du béton.

Tableau I.2 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.

I.7.2 Essai micro-Deval

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. L'essai micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches.

Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

Par définition cette quantité sans dimension est appelée, suivant la méthode employée :

- Coefficient micro-Deval sec du granulat (MDS).
- Coefficient micro-Deval en présence d'eau du granulat (MDE).

Expression des résultats : $\%MD = 100 M - M' / M$.

M' : masse après essais de l'échantillon.

LA : coefficient Los Angeles.



Figure I.11 : Appareille micro-Deval.

I.7.3 Essai los Angeles

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulet normalisés dans la machine Los Angeles.

L'essai Los Angeles a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par choc et la résistance obtenue par frottement des granulats.



Figure I.12 : Essai los angles

$$\%LA = 100 \frac{M - M'}{M}$$

M : la masse de l'échantillon

M' : masse après essais de l'échantillon

LA : coefficient Los Angeles.

I.8 Les avantages et inconvénients du béton

- Les Avantages du béton

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication [14].

Les Inconvénients

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste les inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation) ;
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux) ;
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage [15].

I.9 Conclusion

Dance ce chapitre nous avons parlé généralement du composant de béton ordinaire et on a définie tous ces composants et on a parlé aussi des méthodes de formulation et aussi de tous les essais de caractérisation sur le béton et les granulats qui on n'a utilisé.

Chapitre II

**Les types des bétons qui existe et
leurs caractérisations**

II.1. Introduction

Avec les nouveaux moyens technologiques, la famille des bétons est en constante évolution. Le béton est un matériau dont la composition peut évoluer. On peut adapter son dosage et ses constituants en fonction des performances recherchées. En répondant aux normes de sécurité et s'adaptant aux envies des hommes, le béton, sous ses différentes formes, répond à nos besoins.

II.2 Le béton léger

Le béton léger est un type de matériau qui vous facilitera grandement la tâche. Ce béton est composé en majorité de constituants l'allégeant, ce qui le rend bien moins lourd qu'un béton ordinaire et par conséquent, bien plus pratique d'utilisation. Les matériaux lourds qu'on retrouve chez les bétons classiques tels que les granulats sont remplacés. A la place, il est possible d'ajouter des billes de polystyrène par exemple. Cette caractéristique rend ce béton très utile dans la réalisation de certains types d'ouvrages tels que pour les fondations ou dans l'isolation.



Figure II.1: Béton léger [16].

II.2.1 Caractéristique

Composé de granulats de faible densité, utilisation éventuelle d'adjuvants entraîneurs d'air.).

II.2.2 Application

Hourdis, cloisons, réhabilitation de bâtiment anciens, remplissages.

II. 3 Le béton auto-plaçant

Le béton auto-plaçant, aussi nommé béton auto-nivelant (BAN) ou bien béton auto-compactant, est un béton se différenciant des autres par son importante fluidité. Une caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers. Il était fréquent de rajouter de l'eau au mélange afin d'obtenir un béton plus fluide mais cela le fragilisait. C'est pourquoi le BAP est une véritable révolution. Apparue dans les années 1980 au Japon, il s'est développé en France à la fin des années 1990. Si le béton auto-plaçant possède une telle fluidité, c'est grâce aux divers adjuvants super plastifiants qui le composent. Ceci a rendu les constructions plus sûres et a grandement facilité les méthodes de mise en œuvre du béton.

II.3.1 Caractéristiques du BAP

Ajout d'adjuvants tels que des super-plastifiants et des agents de viscosité dans la composition. Béton très fluide se mettant en place sans avoir recours à un système de vibration.

II.3.2 Application de BAP

Le BAP est majoritairement retrouvé dans les constructions au sol. Il est employé dans de nombreuses applications :

- Dalles.
- Radiers.
- Plancher chauffant.
- Poteaux, poutres, voiles.
- Fondations superficielles.

II.4 Le béton fibré

Comme son nom l'indique, le béton fibré est un matériau composé de fibres. Lors de la formulation de ce béton, des fibres sont ajoutées aux divers matériaux qui le composent. Pour

obtenir un béton fibré à la hauteur des performances recherchées, vous devez obtenir un mélange dans lequel les fibres sont réparties de manière homogène. Ces fibres, de composition diverse, permettent d'obtenir un béton amélioré qui peut convenir à de nombreux usages.

II.4.1 Caractéristiques du béton fibré

Avant tout, il faut savoir qu'on appelle « fibre » un matériau d'une longueur allant de 5 à 60 mm. Il existe plusieurs natures de fibres : métalliques, organiques et céramiques. En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier.

Le principal avantage que présente le béton fibré métalliquement par rapport au béton ordinaire est le remplacement total ou partiel de ferraille dans la composition. Le but premier dans l'utilisation de ces fibres est donc de remplacer les armatures traditionnelles, ce qui facilite l'application du béton. Pas de découpe ni de manipulation de ferraille à prévoir. De plus, elles ont aussi la capacité d'offrir au béton certaines propriétés telles qu'une résistance au feu augmentée ou une diminution des risques de fissuration.

Les fibres organiques, quant à elles, améliorent le comportement du béton au jeune âge. Le treillis anti-fissuration devient inutile, le béton est plus homogène et les retraits de dessiccation pendant la phase de prise sont limités.

Les fibres sont intégrées dans le béton afin de l'améliorer. Mais il est bon de savoir que ces fibres lui confèrent également d'autres caractéristiques qu'on ne retrouve pas chez les autres bétons.

Familles de fibres	Matériaux	Caractéristiques
Fibres métalliques	Acier, Fonte, Inox	Bonne résistance à la flexion, à la traction et à la rupture. Réduction de la dimension des fissures.
Fibres organiques	Acrylique, Aramide, Carbone, Kevlar, Polyamide Polypropylène/Polyéthylène, Polypropylène	Réduction de la fissuration au jeune âge (retraits plastiques). Fibres souples, ce qui améliore leur ouvrabilité. Peu résistantes aux températures élevées (140-170°C maximum).
Fibres minérales	Basalte, Mica, Verre, Wollastonite	Excellente tenue au feu (800°C maximum). Bonne isolation thermique. Permet la fabrication de parois très minces.

Tableau II.1 : Les familles de fibre

II.4.2 Application

On retrouve le béton fibré dans de nombreuses applications similaires au béton ordinaire:

- Dalles.
- Fondations.
- Planchers.
- Voiles.
- Enduits.

II.5 Le béton sablé

Le béton sablé est un béton de ciment classique, qui a la même formulation de base que le béton coulé traditionnel mais dont les proportions et couleurs des granulats changent.

Concrètement, le béton fraîchement coulé est décapé en surface au moyen de jets de sable haute pression. Cette opération permet de mettre en valeur les granulats en les blanchissant pour un effet esthétique plus fin et soigné que pour le béton traditionnel. En revanche, et à l'inverse du béton désactivé, les granulats ne sortent pas de la surface du béton.

Finalement, on obtient un matériau un peu plus rugueux que le béton poncé, mais tout de même moins que le désactivé ou encore le matricé. Le béton sablé est plus agréable au toucher et dispose d'une meilleure adhérence. Toutes ces caractéristiques font de lui un revêtement particulièrement apprécié des particuliers pour leurs chantiers de rénovation ion.



Figure II.2 : Coulage de béton sablé [16].

II.5.1 Application de béton sablé

Procéder à la construction d'une dalle en béton sablé est une opération minutieuse, qui doit absolument être réalisée par un professionnel.

Le principe est le suivant : une machine à air comprimé appelée sableuse permet une éjection à forte pression directement sur la surface du béton. Ce traitement mécanique appelé sablage est appliqué après durcissement du béton, de sorte de ne pas altérer ses propriétés mécaniques.

Le décapage de la dalle de béton grâce au sablage permet de décaper la surface de la dalle de béton et dans ce cas précis, de faire ressortir les granulats et de conférer un aspect uniforme et doux au béton. On estime que l'opération est terminée lorsqu'il n'y a plus d'effervescence au contact du béton. Par la suite, comptez environ 28 jours de séchage.

II.6 Le béton désactivé

Le béton désactivé est l'un des bétons décoratifs les plus appréciés aujourd'hui. Très esthétique, il est régulièrement utilisé, que ce soit par des particuliers ou des professionnels. Vous pourrez retrouver du béton désactivé dans les jardins, en tant qu'allée ou terrasse. Mais il est de même possible de rencontrer du béton désactivé en plein centre-ville, comme les nombreux trottoirs ou rues piétonnes peuvent le montrer. La technique de mise en œuvre du béton désactivé lui est spécifique.



Figure II.3 : Terrasse en béton désactive [16].

II.6.1 Caractéristiques du béton désactivé

Vous constaterez que les possibilités qu'offre le béton désactivé en termes d'aspect sont nombreuses et variées. Cela explique pourquoi le béton désactivé fait partie des bétons décoratifs les plus demandés aujourd'hui! Ce béton vous donne la possibilité de le personnaliser en choisissant son aspect et ses coloris.

Cela est devenu possible grâce à la création de granulats et de pigments colorés qui offrent dorénavant un large choix quant à l'apparence du béton.

On a également recours au béton désactivé pour certaines de ses propriétés :

- C'est un béton très résistant aux intempéries, pouvant s'adapter à toutes sortes de terrain.
- L'exposition des granulats n'est pas seulement plaisante à la vue, cela permet au béton désactivé d'être un fort antidérapant.

II.7 Les bétons hauts performances

Les bétons hautes performances (BHP), apparus dans les années 1980, sont caractérisés par des résistances mécaniques (allant de 50 à 100 Mpa) élevées par rapport à celles du béton traditionnel (25 à 35 Mpa). Au-delà d'une résistance de 100 Mpa on parle de béton très hautes performances (BTHP).

II.7.1 Les Avantages de BHP

- Résistance élevée à la compression, ce qui permet de réduire les quantités de béton nécessaires.
- Porosité très faible, entraînant une résistance accrue vis-à-vis des agressions extérieures.
- Résistance élevée à l'état frais, ce qui permet d'augmenter la vitesse des travaux.

II.7.2 Durabilité

- La durabilité de ce matériau permet son utilisation dans des environnements hostiles.

II.8 Le béton lavé

Le béton lavé est un autre type de béton décoratif, très proche du béton désactivé. Très esthétique, on le retrouve régulièrement au sein des jardins sa fin de constituer des terrasses ou bien dans la voirie. Le béton lavé se caractérise par son aspect granuleux et son toucher rugueux.

Si vous voulez obtenir du béton lavé, il y a une technique de mise en œuvre spécifique. Cette méthode, comme dans le cas du béton désactivé, permet d’obtenir un aspect granuleux et un toucher rugueux, ce qui fait tout le charme du béton lavé. Ce dernier donne l’impression d’avoir une allée en gravier sans les inconvénients ! Et oui, avec le béton lavé, fini les graviers qui s’éparpillent sans arrêt. C’est donc un béton qui a tout pour plaire, à la fois esthétique et facile d’entretien.

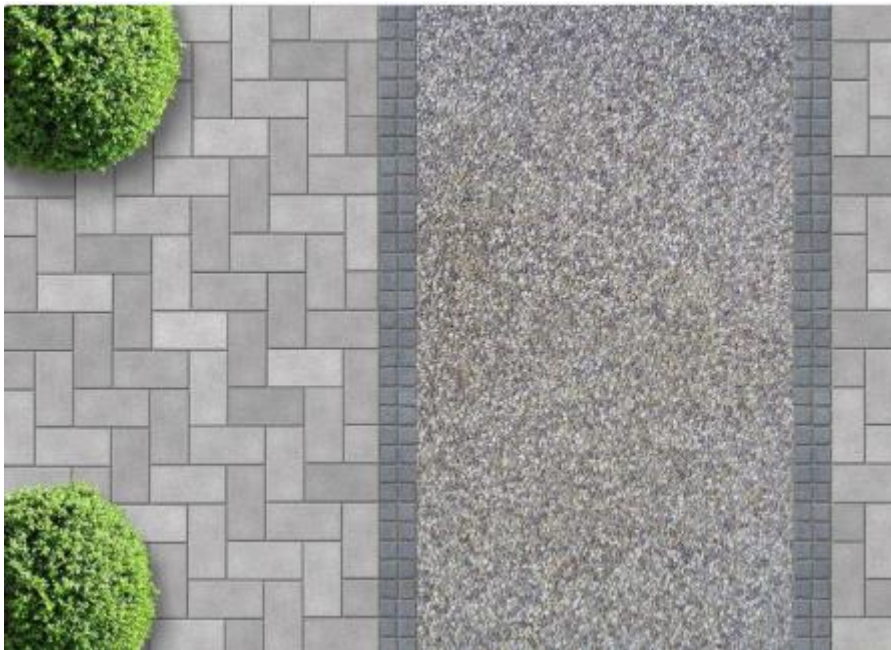


Figure II.4 : Voie en béton lavé [16].

II.8.1 Caractéristiques du béton lavé

Comme le béton désactivé, vous constaterez que les possibilités qu'offre le béton lavé en termes d'apparence sont nombreuses et variées. Vous pouvez adapter les constituants de votre béton en fonction de l'aspect désiré. C'est donc un béton décoratif entièrement personnalisable.

II.8.2 Application du béton lavé

On retrouve le béton lavé dans les mêmes domaines d'application que pour le béton désactivé.

- Place, cour.
- Voirie urbaine.
- Trottoir.
- Piste cyclable.
- Parking.
- Rue piétonne.
- Allées de jardin.
- Terrasse.

II.9 Le béton bitumineux

Egalement appelé enrobé ou enrobé bitumineux, le béton bitumineux est composé de sable, de gravillons, de filer et de bitume comme liant. Ce type de béton est principalement utilisé pour les routes, mais il peut être idéal pour une allée de jardin ou de garage.



Figure 5: Sol en béton bitumineux [16].

II.9.1 Les types de béton bitumineux

On distingue de nombreux types de béton bitumineux, chacun avec ses caractéristiques propres:

- **Le béton bitumineux mince (BBM)** : possède une granulométrie de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux est facilement compactable et est parfaitement imperméable. Principalement utilisé pour les parkings ou les trottoirs, son épaisseur varie de 2.5 à 5 cm.
- **Le béton bitumineux très mince (BBTM)** : c'est sans doute l'enrobé le plus intéressant en termes de rapport qualité-prix. En effet, il dispose d'une très bonne durée de vie ainsi que d'une facilité de mise en œuvre. Quelle que soit la granulométrie (0/10 ou 0/6), le BBTM dispose d'une épaisseur comprise entre 1.5 et 3 cm.
- **Le béton bitumineux ultra mince (BBUM)** : destiné à une couche de roulement, c'est-à-dire en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, il est tout indiqué pour un parking par exemple. Son épaisseur varie de 1 à 1.5 cm.
- **Le béton bitumineux souple (BBS)** : comme son nom l'indique, ce béton est constitué d'un bitume assez mou pour obtenir un enrobé déformable. Cependant, il possède une faible résistance à l'orniérage.

- **Le béton bitumineux drainant (BBM)** : l'avantage principal de ce type de béton bitumineux réside dans son excellente adhérence, aussi bien par temps de pluie ou de forte chaleur. De plus, il réduit le bruit de roulement. Pour une allée de jardin, il est alors parfaitement adapté !
- **Le béton bitumineux semi-grenu (BBSG)** : celui-ci est l'enrobé à chaud de référence. En effet, il répond à de nombreux besoins (trottoir, allée...) et est très adapté pour un trafic aussi bien moyen que lourd. Son épaisseur varie de 3 à 9 cm, suivant la granulométrie.

II.9.2 Application du béton bitumineux

Pour appliquer le béton bitumineux, il est indispensable de faire appel à une entreprise. En effet, les professionnels disposent du matériel (centrale d'enrobage et de malaxage) et des connaissances adéquates. Ils sont également en mesure de vous conseiller sur le type d'enrobé bitumineux à choisir pour votre projet. Toutefois, avant de faire appel à des professionnels vous devez vous assurer de la propreté de votre surface à enrober.

II.10 Béton projeté

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

II.10.1 Technique de projection

- Projection par voie sèche : le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateurs de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur. Il est propulsé par de l'air comprimé le long d'une tuyauterie vers la lance de projection. L'eau arrive séparément à la lance en quantité nécessaire et réglable pour assurer l'humidification du mélange juste au moment.
- Projection par voie humide : le mélange granulats-ciment-eau est malaxé dans une centrale. Il est ensuite pompé le long d'une tuyauterie jusqu'à la lance de projection. La projection est assurée par de l'air comprimé éventuellement associé à des adjuvants liquides.

Chapitre II : Les types des bétons qui existe et leurs caractérisations

Le type de ciment est choisi en fonction de l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage. Des fibres métalliques peuvent être incorporées dans le béton à un dosage de l'ordre de 35 à 50 kg/m³. Elles permettent d'améliorer la cohésion du béton et sa tenue sur le support. La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur (quelques centimètres) et d'épouser parfaitement la géométrie du support.

Elle est utilisée en particulier pour la réalisation de travaux souterrains (soutènement de parois, de galeries ou de puits ou de front de taille de tunnels en cours de creusement) ou de travaux d'assainissement, aussi bien en travaux neufs qu'en réparation d'ouvrages anciens [16].

Chapitre III

Les causes de dégradation du béton

III.1 Introduction

L'étude de réhabilitation pour un site bien défini nous incite à faire un diagnostic, à comprendre et à chercher l'origine des différentes causes de dégradations spécifiques à cet environnement et à l'identifier. Ces différentes causes seront définies dans ce chapitre.

III.2 Causes de dégradations internes (endogènes)**III.2.1 Réaction alcali-granulat**

La réaction alcali-granulats est une réaction chimique à évolution lente entre certains granulats dits « réactifs » et les alcalins normalement présents dans la solution interstitielle du béton ou introduits par des agents extérieurs. Cette réaction conduit à la formation d'un gel de silicate suivie d'un gonflement du béton qui provoque une fissuration importante et une perte de résistance considérable.

Afin qu'une réaction alcali-granulats ait lieu, les trois conditions suivantes doivent être réunies mais ne donnent pas forcément lieu à la réaction :

- Présence de granulats réactifs (silice mal cristallisée)
- Milieu ambiant humide
- Teneur suffisante en alcalins dans le béton (calcium, sodium)

III.2.2 La réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne résulte d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire qui, normalement, se transforment en ettringite primaire lors de la prise du béton.

Si cette réaction ne peut avoir lieu, l'ettringite secondaire (également dite différée) expansive peut se former ultérieurement dans le béton durci et provoque son gonflement et sa désorganisation.

Cette remobilisation des sulfates nécessite une élévation de température notable et durable du béton pendant sa prise (par exemple, $> 75^{\circ}\text{C}$ pendant plus de 4 heures), la réaction se produit donc essentiellement dans des bétons étuvé sou des pièces massives (piles de pont de section importante par exemple).

D'autres paramètres de la réaction sulfatique interne :

- Teneur en alcalins du béton,
- Teneur en SO_3 et Al_2O_3 (C_3A) du ciment,
- Formulation du béton (dosages en ciment, E/C, granulats),
- Humidité relative du ciment.

III.2.2.1. Dégradation dus à la réaction sulfatique interne

Les désordres provoqués par l'attaque sulfatique sont du principalement au gonflement du béton.

- Un faïençage à mailles plus ou moins larges.
- Eclatements localisés de la matrice cimentaire au droit du granulat.

III.3 Causes de dégradations par des agents extérieurs (exogènes)

Selon la nature du sol, caractéristiques de l'environnement et la nature des produits stockés, les eaux qui ruissellent ou qui stagnent sur les structures peuvent être chargées de sels minéraux plus ou moins agressifs pour le béton. Les milieux les plus agressifs pour le béton sont soit salins (chlorures, nitrates et surtout sulfates de sodium, de calcium et de magnésium), soit acides [17].

III.3.1 Corrosion du béton armé due à la pénétration de O_2 et H_2O

La corrosion des armatures du béton armé est une pathologie fréquemment en contrée en génie civil. Les facteurs qui sont à l'origine de cette pathologie sont schématisés sur la fig. III.1

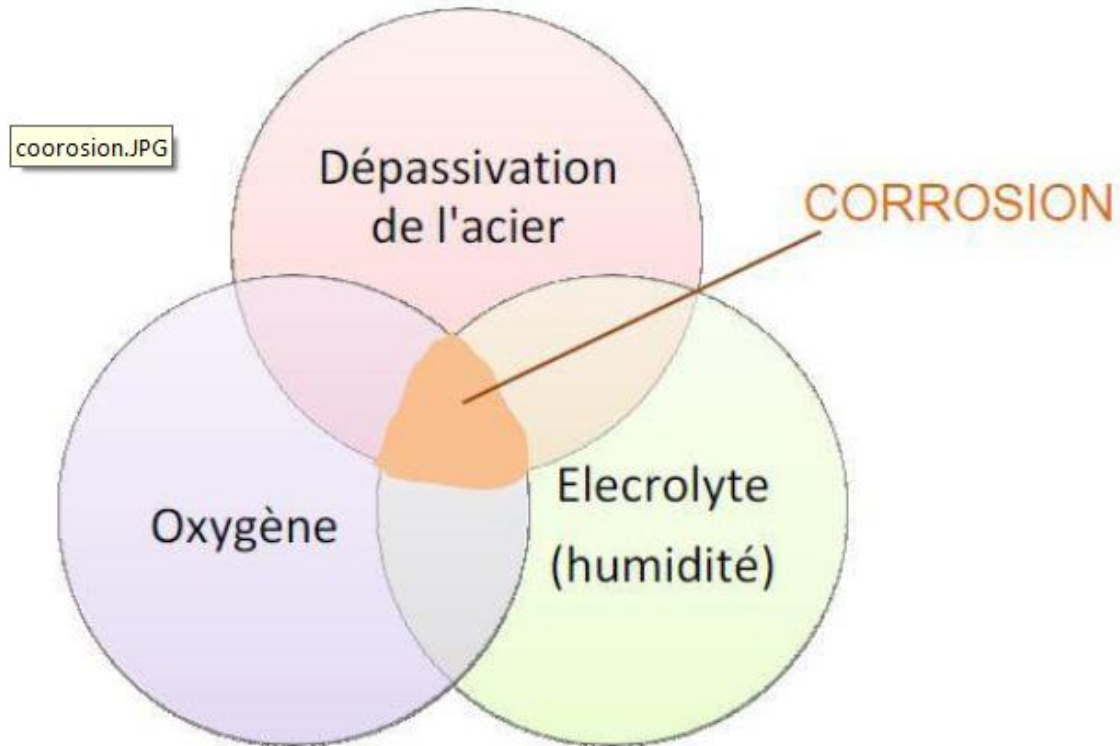


Figure III.1: Réunion des facteurs de la corrosion [17].

L'acier enrobé dans le béton peut, sous certaines conditions, se dépassiver et engendrer des désordres notables pour le comportement en service de la structure par la diminution de sa capacité portante.

Les causes d'une telle fragilisation peuvent être par exemple la perte de ductilité de l'acier ou bien encore la perte d'adhérence acier-béton.

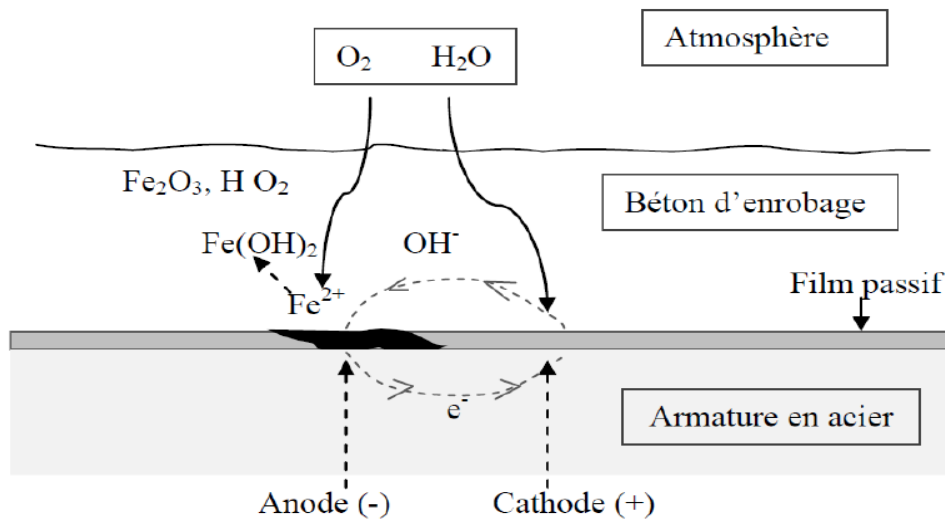


Figure III.2 : Processus électrochimique de la corrosion des armatures par [18].

III.3.1.1 Dé passivation des aciers par la carbonatation

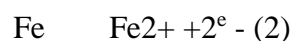
Le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique pénètre dans le matériau par diffusion à travers le réseau poreux. L'état de saturation est un facteur déterminant en ce qui concerne le niveau de carbonatation fig. III. 3 ; trois cas peuvent être envisagés :

- Le réseau poreux est saturé : la diffusion du CO_2 est très faible,
- Le béton est très sec : la diffusion est rapide mais l'absence d'eau limite les réactions de carbonatation,
- La carbonatation est optimale pour une humidité relative d'environ 60%, le CO_2 se diffuse rapidement dans le pore puis réagit avec les molécules d'eau adsorbées à la surface du pore et la fig. III. 5 témoigne de ça.

Le CO_2 ainsi diffusé réagit avec les principaux hydrates, notamment le portlandite selon la réaction suivante (1) :



Le calcium Ca^{+2} est dissout et passe en solution, abaissant la basicité de la solution interstitielle jusqu'à un pH inférieur à 9, l'acier est alors dépassivé. Dès lors, les armatures s'oxydent selon l'équation (2)



Ce processus est ainsi alimenté jusqu'à la corrosion complète de l'armature, la corrosion par carbonatation est dite « généralisée ».

III.3.1.2 Vitesse de carbonatation

Après un temps assez court, d'un à trois mois, la vitesse de carbonatation devient à peu près inversement proportionnelle à la profondeur déjà carbonatée car la couche superficielle de carbonate formée freine la diffusion du gaz carbonique [19].

III.3.1.3 Les principaux facteurs influant la carbonatation

- La composition du béton,
- Le dosage en eau et en ciment rapport E/C,
- Le milieu et la nature de l'ouvrage,
- Le rapport surface/volume.

Suivant la quantité de chaux renfermée dans le ciment, l'humidité du matériau et de l'ambiance, enfin et aussi de l'exposition, le phénomène évoluera différemment. Dès la formation superficielle des premières couches carbonatées, les phénomènes ralentit ou s'annule [19].

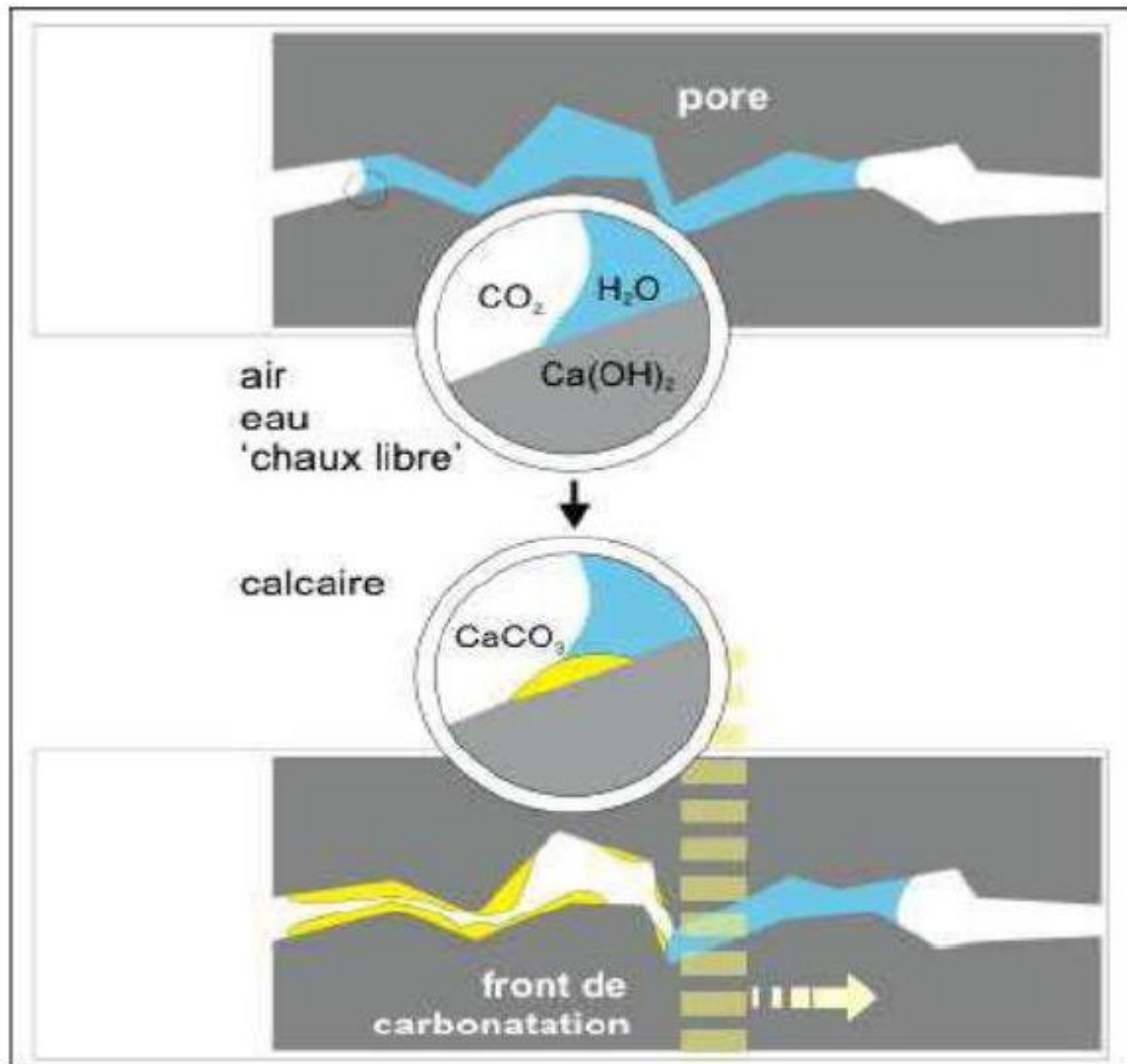


Figure III.3 : Processus de carbonatation [20].

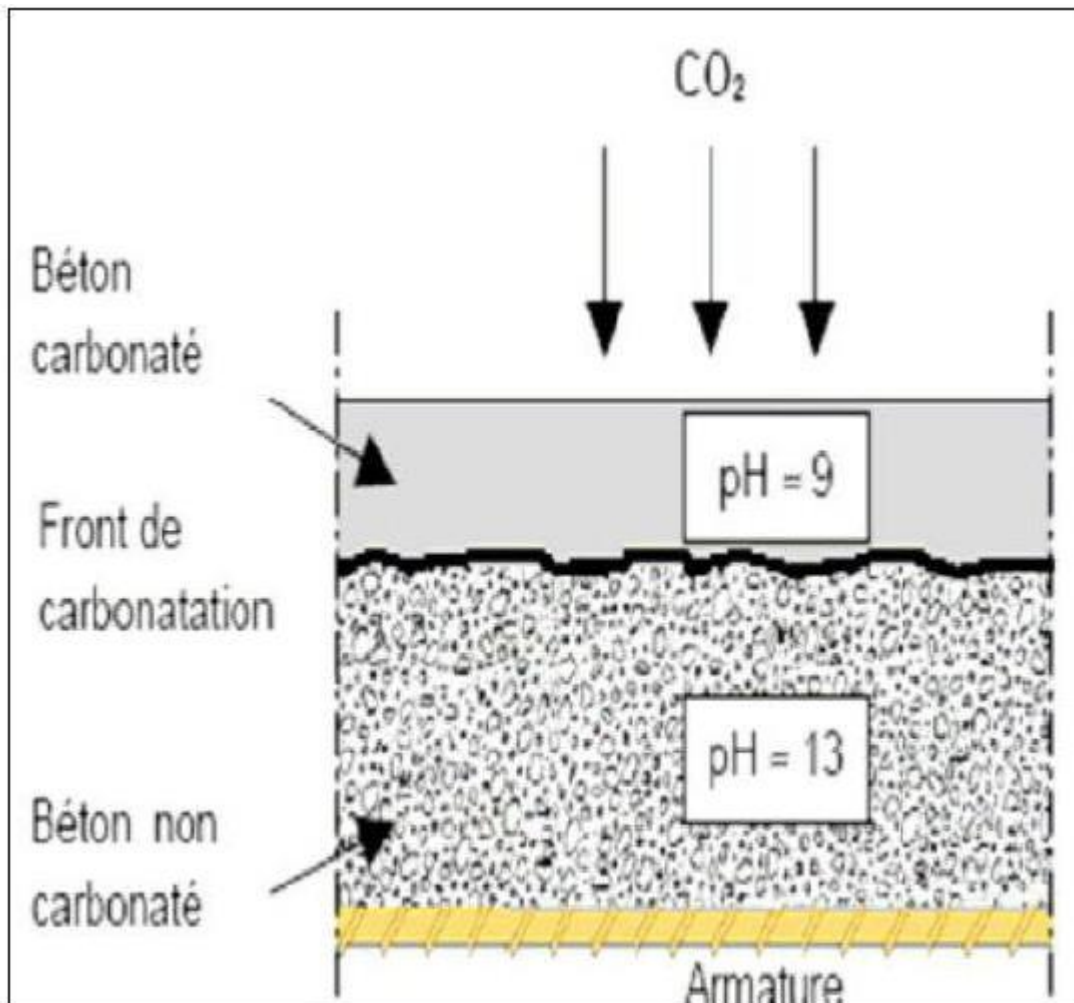


Figure III.4 : Processus général de carbonatation [20].

III.4. Action des agents agressifs sur le béton

III.4.1 Actions des chlorures Cl^-

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans les quels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns).

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion et initier le phénomène de corrosion (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction : métal ions métal $\text{Mn}^+ + n$ électrons).

La vitesse de pénétration des chlorures dépend en particulier de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

La corrosion des armatures s’amorce dès que la teneur en chlorure eau niveau des armatures atteint un certain seuil de dé passivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures; il est de l’ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

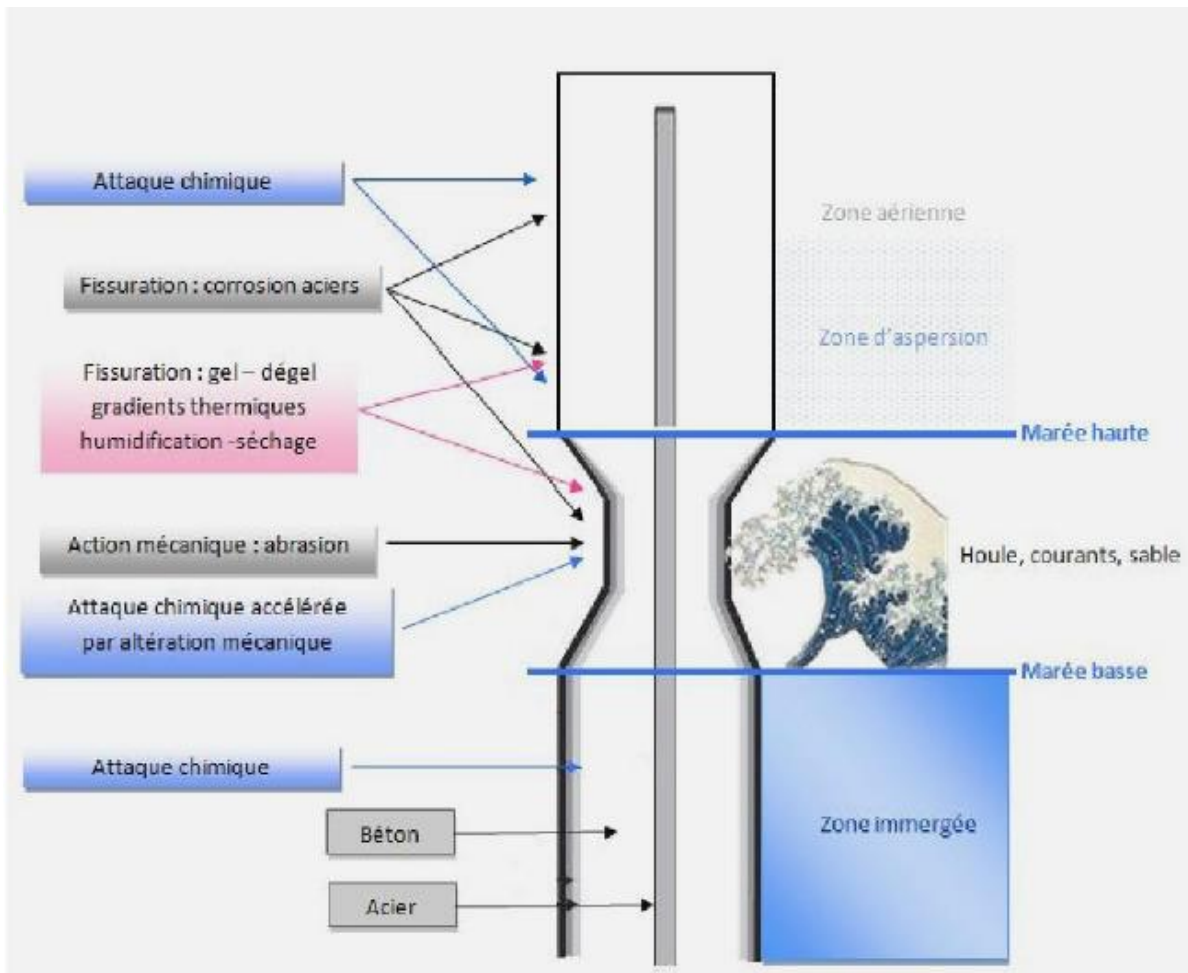


Figure III.5 : Pénétration des ions chlorures et initiation de corrosion [21].

III.4.2 Actions de l’eau de mer

L’agressivité de l’eau de mer vis-à-vis du béton est liée aux attaques combinées de diversions (chlorures, sulfates, nitrates ...) qui pénètrent dans le béton par capillarité ou par diffusion.

Les divers chlorures dissous dans l’eau de mer ($MgCl_2$) ($CaCl_2$) génèrent des réactions chimiques agressives pour les bétons qui se traduisent par une dissolution de la chaux et une précipitation d’ettringite (cristallisation des els expansifs, La portlandite présente dans les hydrates est attaquée par le sulfate de magnésium pour former dans le béton du gypse

secondaire $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de la brucite Mg (OH)_2 . Ce gypse secondaire se dissout en partie, ce qui augmente la porosité du béton. Les ions Mg^{2+} réagissent aussi avec les CSH.

MgCl_2 est le chlorure le plus agressif. Il réagit avec le portlandite pour donner du chlorure de calcium CaCl_2 en partie soluble, qui augmente la porosité du béton.

L'autre partie réagit avec l'aluminat de chaux hydraté pour former des chlorures aluminates $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaCl}_2, 10\text{H}_2\text{O}$ (sel de Friedel). Ce sel, également expansif, entraîne la fissuration du béton.

III.4.3 Action des eaux agressives

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels solubles en solution dans l'eau (eaux souterraines, eau de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées de sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton. En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formule du béton n'est pas optimisée.

La dégradation chimique du béton sous l'effet de sulfate a des conséquences d'ordre macroscopiques et en particulier d'ordre mécanique : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et physico-chimiques: affaiblissement des propriétés liantes, modification de la porosité.

III.4.4 Actions de gel

Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- Une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
- Un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.



Figure 6: Action de gel [21].

III.4.5 Actions des sels de déverglaçage

Il est admis que la cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques [21].

III.4.6 Attaque due aux acides

Le principal milieu externe d'agression chimique pour le béton, c'est le milieu acide. Lorsque les acides entrent en contact avec le béton, ils dissolvent la chaux produite par l'hydratation du ciment, faisant alors progressivement diminuer le pH et ils annihilent ainsi la passivation des aciers mais aussi la résistance du béton. Plus le pH est faible, plus l'attaque est importante.

III.4.6.1 Attaque due au H_2SO_4

Le H_2SO_4 qui se trouve dans les milieux industriels sous forme gazeuse et liquide présente un effet néfaste sur le béton, acier et même la santé des ouvriers.

Sachant que le béton est de PH basic cette propriété joue un rôle très important dans la durabilité du béton, mais la présence des produits chimiques tel que H_2SO_4 à proximité des constructions pose un problème réel.

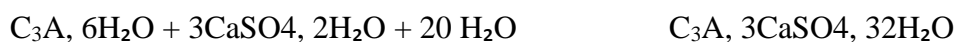
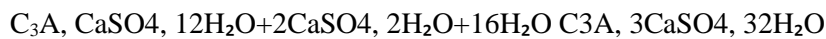
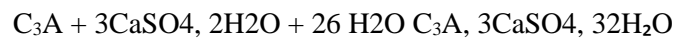
L'attaque de l'acide sulfurique sur le béton armé se traduit par une perte de masse (détérioration), et la résistance à la compression diminue d'une manière tragique tout c'est le résultat des réactions chimiques entre l'acide et les constituants du ciment à savoir :

- D'une part la formation du gypse secondaire suite à la lixiviation (dissolution) de la portlandite (Ca (OH)₂) et silicates de calcium hydratés C-S-H selon la notation cimentière CaO, S= SiO₂, H=H₂O

et le carbonate de calcium (Ca CO₃) des ajouts selon



- D'autre part la formation de l'ettringite secondaire ; produit des réactions entre l'aluminate de calcium C₃A (3CaO, Al₂ O₃), le monosulfoaluminate et étra calcique (C₃A, Ca SO₄, 12H₂O) et l'hydrate d'alumine (C₃A, 6H₂O) et le gypse respectivement selon :



Les solides ainsi formés possèdent deux volumes beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance; il en résulte donc une expansion qui conduira à la détérioration donc l'attaque du béton par le H₂SO₄ peut engendrer une lixiviation du béton et une dé passivation des armatures en réduisant le PH de la solution interstitielle [22].

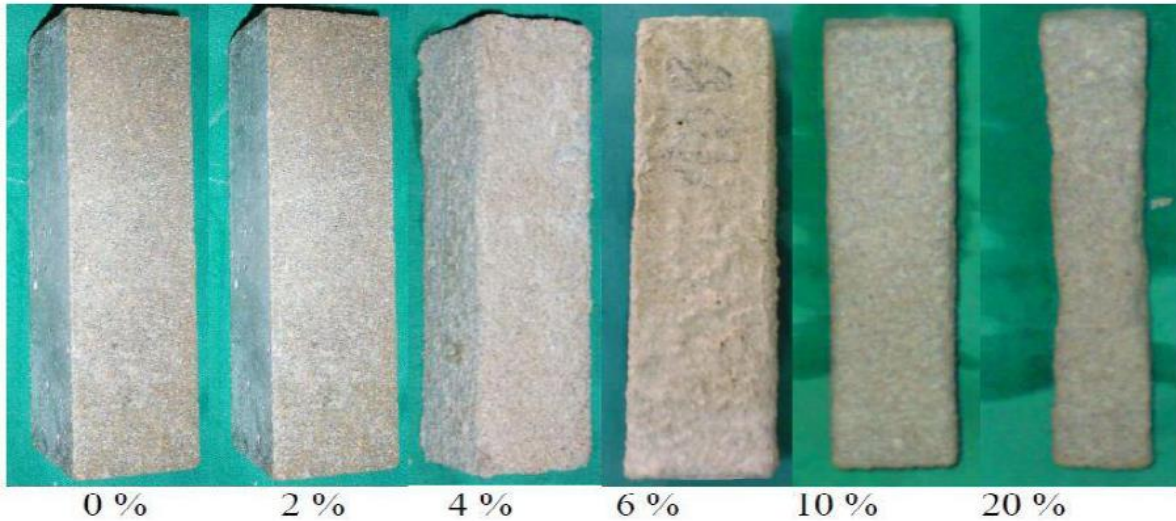


Figure III.7: Evolutions de dégradation des éprouvettes en mortier de ciment dans des milieux acides à différentes concentration [22]

III.4.6.2 Attaque sulfatique externe

Les sulfates, source de cette attaque, ont des origines naturelles mais aussi accidentelles, notamment la pollution industrielle :

- Les sols peuvent contenir naturellement une quantité de sulfates (de 0.01 à 0.05%).

Dans le cas des sols constitués de roches gypseuses cette teneur peut être supérieure à 5%.

- Les eaux souterraines séléniteuses proviennent de la dissolution de nappes de gypse. Elles

Peuvent aussi provenir de la dissolution de tous les sulfates alcalins.

- L'eau de mer est naturellement chargée en sulfates, le **tableau. III. 1** représente la composition ionique de la mer méditerranéenne [23].

Espèce ionique	Méditerranée (g/l)
Cl^-	21.4
Br^-	0.07
SO_4^{2-}	3.06
CO_3^{2-}	
Na^+	11.6
K^+	0.4
Ca^{2+}	0.47
Mg^{2+}	1.8

Tableau III.1 : Composition ionique de la mer méditerranéenne [23].



Figure III.8: Canalisation dégradée [17].

Les ions sulfatiques ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite secondaire, le gypse secondaire et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

Ces solutions de sulfates peuvent être combinées avec les aluminates tricalciques du ciment C3A pour former une expansion dans la structure du béton dite : l'étringite ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

La figure III.9 présente les photos des hydrates (C_3A) et d'étringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)

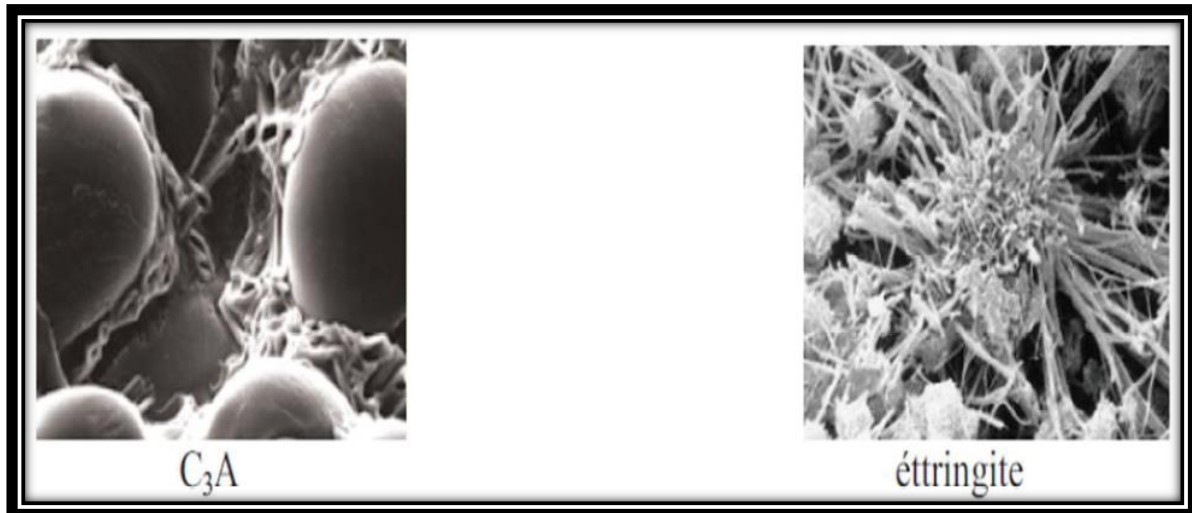


Figure III.9: microscopiques de C_3A et d'étringite [17].

III.4.7 Causes de dégradation dues à l'âge du béton

Le phénomène du fluage se produit à moyen et à long terme, ce dernier concerne les ouvrages en béton armé.

La déformation d'un élément en béton soumis à un chargement de longue durée est la somme de la déformation dite instantanée et de la déformation différée due au fluage.

Déformation instantanée : c'est la déformation qui se produit sous l'effet d'un chargement de courte durée (jusqu'à quelques jours).

Déformation différée : le chargement étant maintenu constant, la déformation croît lentement, à vitesse décroissante, jusqu'à atteindre, après plusieurs années, sa valeur maximale qui est, en ordre de grandeur, le double de celle de la déformation instantanée. Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est en fonction notamment des caractéristiques du béton, de son âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps. Le fluage est un phénomène complexe, constaté mais encore mal compris. Il serait lié à des effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice ainsi qu'à un processus de réaménagement de la structure des cristaux hydratés du liant. C'est Eugène Freyssinet qui, le premier, dès 1912, a mis en évidence ce phénomène et en a mesuré les conséquences sur le comportement des structures en béton armé et en béton précontraint

(réduction de la résistance sous charges soutenues, pertes de précontrainte, redistribution de moments).

III.4.8 Causes de dégradation physiques

Abrasion : Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.

Erosion : Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.

Cavitation : Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

Chocs : Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.

Surcharges : Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.

Le feu : Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

Cycle gel/ dégel : Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

III.4.9 D'autres causes de dégradation

Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

Mauvais positionnement des armatures : les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.

Mauvaise qualité des bétons employés un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

Vibration trop importante : une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants.

Absence de cure du béton : la cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se fâçonne en surface [17].

III.5 Conclusion

A la fin de ce chapitre nous concluons que le béton destiné aux ouvrages hydrauliques doit être étanche et résistant aux agents agressifs internes et externes. Pour l'obtention de ce type, on peut jouer sur plusieurs paramètres de la composition du béton tel que le rapport E/C, le dosage et le type de ciment ainsi que l'utilisation d'additifs et d'adjuvants.

Chapitre IV

Les méthodes D'auscultation du béton

IV. 1 Introduction

La dégradation des ouvrages d'art en béton armé s'avère un défi de taille pour les propriétaires qui doivent affronter les problématiques associées à leur vieillissement. L'auscultation du béton armé constitue un outil décisionnel puissant pour l'ingénieur responsable de maintenir en service et de prolonger la durée de vie des structures.

Les inspections visuelles, sondage au marteau, relevé de fissuration et suivi de l'évolution de la fissuration sont nécessaires pour déterminer les méthodes d'intervention adéquates et rentables à long terme. Outre ces méthodes, les techniques d'auscultation non destructive proposées par Englobe, telles que l'auscultation par la technique du Géoradar, le relevé ultrasonique, le relevé de potentiel de corrosion, permettent de cibler les zones de dégradation non visible lors d'une inspection visuelle. L'identification des zones de dégradation permet de localiser de façon judicieuse et minimiser les prélèvements d'échantillons de béton et ainsi diminuer l'impact résultant des multiples prélèvements de béton au cours des années.

IV.2. Méthodes D'essais

Il existe différents types de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir desquelles, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests suivants : Essai au scléromètre, essai d'auscultation dynamique, essai par carottage.

IV.3 Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de : L'énergie de recul ; Caractéristiques des systèmes de ressorts, La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage. La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit un dispositif mobile (commandé par un ressort) à la suite d'une collision entre le dispositif et la surface du béton. Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours il a été développé par ERNST SCHMIDT EN (1948) et est connu sous le nom l'essai au

marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt (photo III.1) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F FELDMAN (1977). En (1984) T. AKASHI ET S. AMASAKI ont déclarés que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre sous-tend des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.



Figure IV.1: Original Schmidt type N/L [25]

IV.3.1 Principe

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur la quelle frappe la masse. Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée. Quelques modèles de scléromètres impriment le relevé des résultats sur un rouleau de papier paraffiné. L'indice de rebondissement est une mesure arbitraire, car elle dépend de l'énergie emmagasinée par le ressort et de la dimension de la masse.

IV.3.2 Appareillage

Il existe plusieurs modèles de scléromètres selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact. Le modèle le plus utilisé est le scléromètre SCHMIDT (Suisse). L'appareil est

composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage.

IV.3.3 Mode Opératoire

IV.3.3.1 Préparation de la surface

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas de nids de gravier, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou d'armature saffleurantes. La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérant où poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

IV.3.3.2 Points de mesures

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30\div 50$ mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

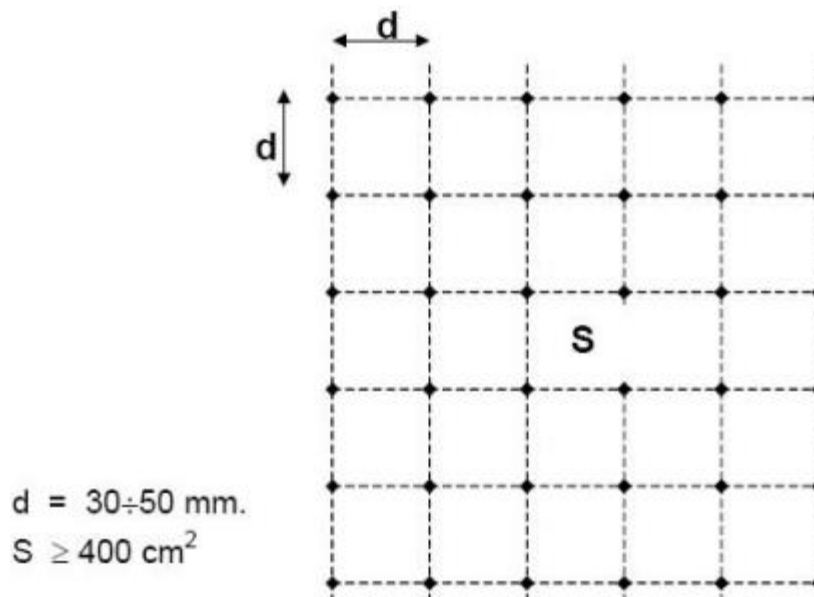


Figure IV.2: Grille de mesure sur ouvrage [24]

Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

IV.3.4 Étalonnage de l'appareil

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations. Deux méthodes sont utilisées :

IV.3.5 Sur bloc en néoprène armé

Effectuer sur le bloc en néoprène, posé sur une assise rigide et plane, deux séries de 27 mesures espacées de 5 s et calculer la moyenne de l'indice sclérométrique l de la 2ème série. La position de l'appareil doit être verticale. Deux cas peuvent se présenter :

- $28 \leq l \leq 32$ le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant ;
- $l < 28$ ou $l > 32$ l'appareil est défectueux ; il sera procédé au nettoyage de l'appareil pour refaire une nouvelle fois la mesure de l

IV.3.6 Sur éprouvettes de béton

Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice sclérométrique l par des mesures effectuées sur trois séries de trois éprouvettes de béton, correspondant aux trois classes de résistances à la compression 15, 25 et 35 MPa. Les mesures de l'indice l_s sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes. Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure III.3. Dans le cas où les trois points représentatifs se retrouveraient à l'intérieur du fuseau, donc le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant. Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux. Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage.

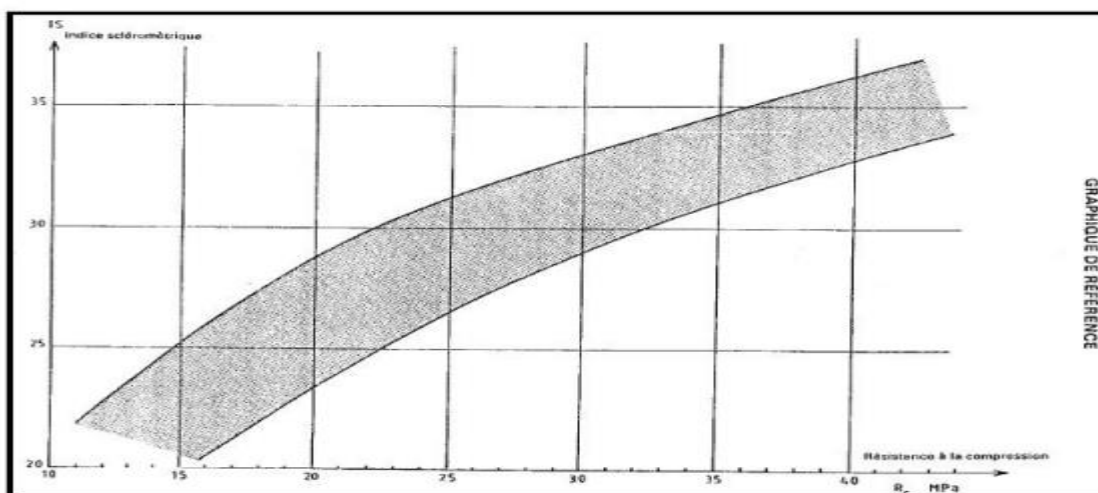


Figure IV.3: Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil [24]

IV.3.7 Inconvénients de la méthode sclérométrique

La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton. Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influents la précision de détermination de cette résistance. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton.

IV.3.8 Les avantage

- C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide [30]
- L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués [31]
- L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface [24].

IV.4 Essai d'auscultation dynamique

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

IV.4.1 Principe

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée. Les impulsions sont produites par des

cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU (1969). La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.



Figure IV.4: appaillage de mesure



Figure IV.5: appaillage d'auscultation soniques 58-E48 avec oscilloscope [24]

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les condition d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

IV.4.2 Mode Opérateur**IV.4.2.1 Travaux préparatoires**

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé.
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

IV.4.2.2 Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points.

IV.4.2.3 Distances minimales entre points de mesures

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

IV.4.2.4 Étalonnage de l'appareil

L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.



Figure IV.6: étalonnage de l'appareille

IV.4.2.5 Manières de mesure

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

a) Mesure en transparence (directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

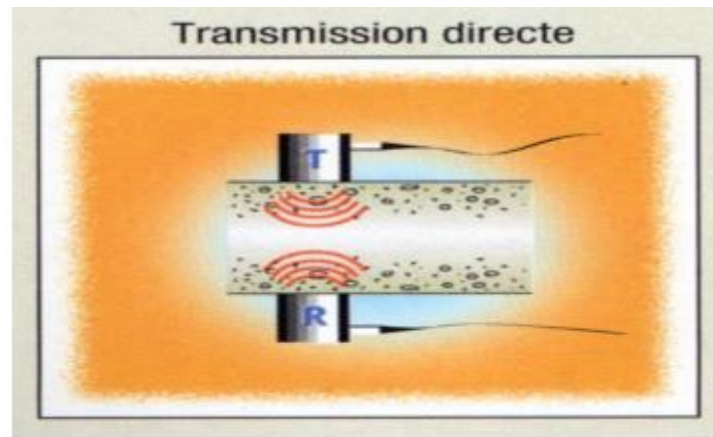


Figure IV.7: Mesures en transparence (directe) [24].

b) Mesures en surface (indirecte)

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur figure (3,7). L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance. Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

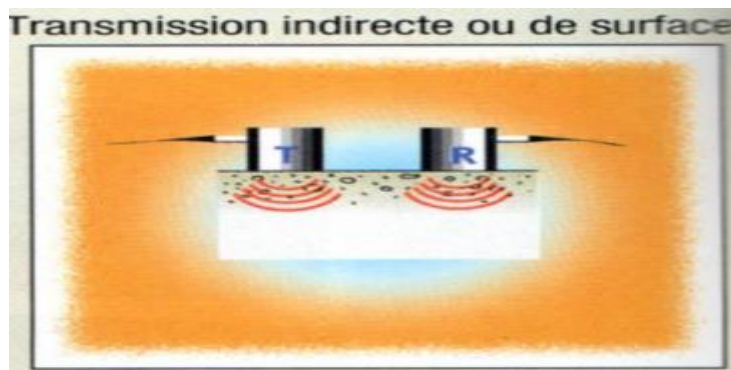


Figure IV.8: mesure en surface (indirecte) [24].

c) Mesures semi directe

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure ou on ne peut pas utiliser les deux autres manières

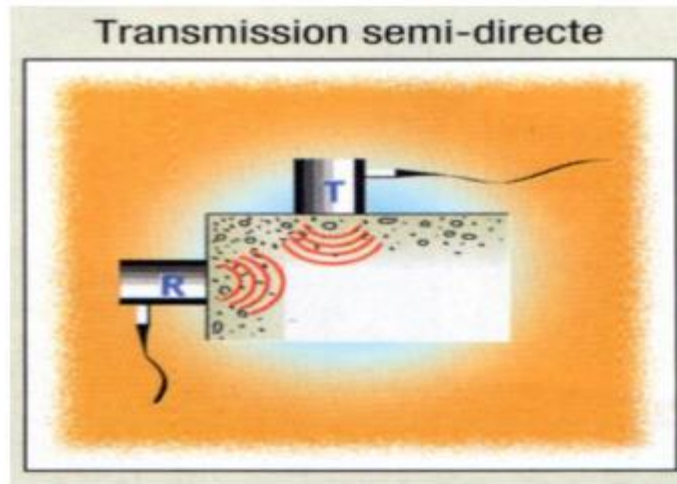


Figure IV.9: Mesures semi directe [24].

IV.4.3 Définitions

Une onde ultrasonore est une vibration mécanique se propageant dans un milieu élastique (solide, liquide ou gaz) et dont la fréquence se trouve au-delà des fréquences audibles. [25]

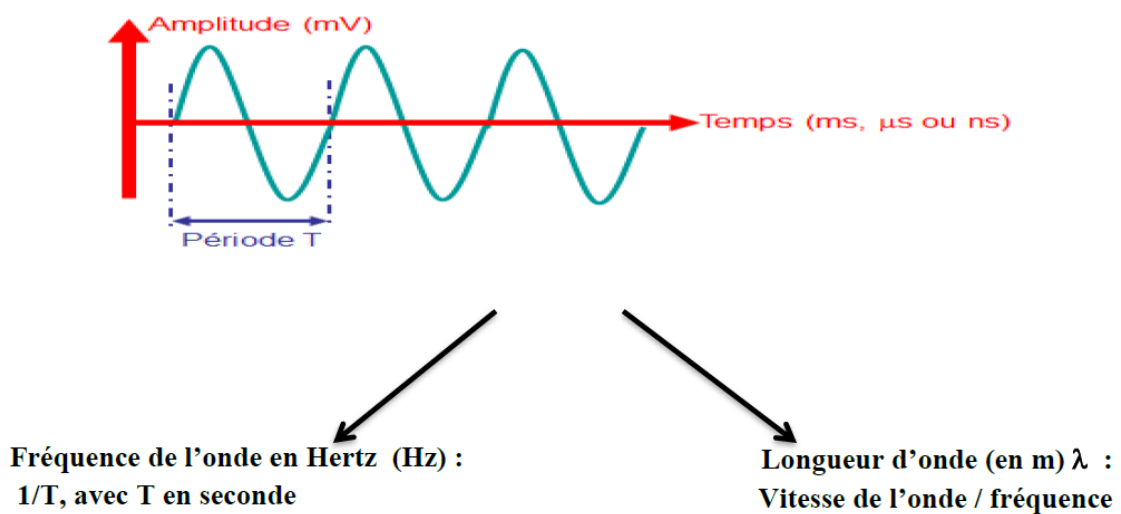


Figure IV.10: Ondes acoustiques

IV.4.4 Paramètres influents la vitesse des ultrasons

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Cependant pour un granulats donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. De plus d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores à savoir :

- Le type de ciment ;
- Le dosage en ciment ;
- La nature des granulats;
- La granulométrie ;
- L'humidité du béton ;
- La maturité du béton ;
- Les adjuvants.

Les résistances des autres bétons qui diffèrent du béton standard pour lequel une courbe de calibrage a été établie, doivent être corrigés en affectant la résistance du béton de référence par des coefficients partiels d'influence correspondants. Exemple de tracés de courbes de calibrage

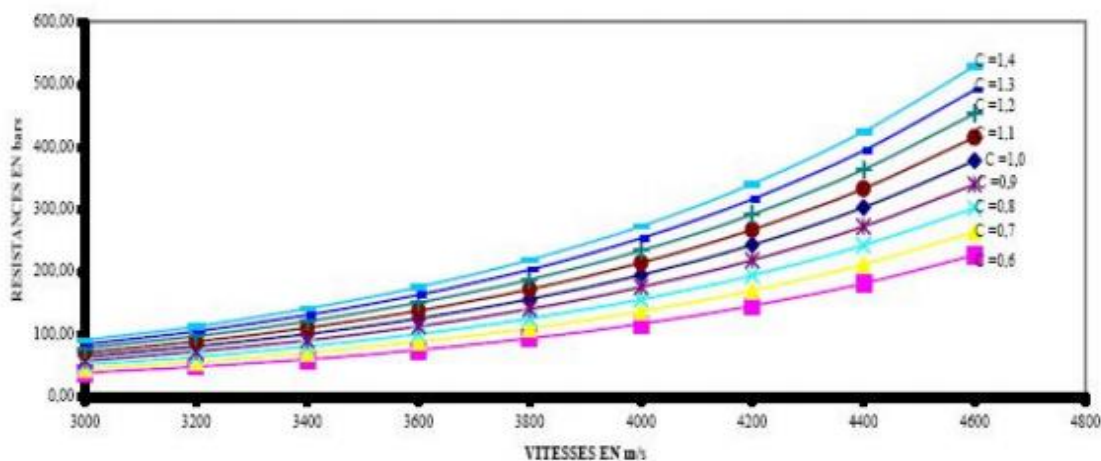


Figure IV.11: courbes de calibrages [26]

Excepté le cas on l'on dispose de courbes de calibrage telles que rappelées ci avant, des cas peuvent se présenter tels que :

- Composition du béton connue, absence d'éprouvettes ou de carottes,
- Composition du béton connue et existence d'un petit nombre d'éprouvettes ou de carottes,
- Méconnaissance de la composition du béton et existence d'éprouvettes ou de carottes,
- Méconnaissance de la composition du béton et inexistence d'éprouvettes et de carottes.

La détermination de la résistance béton in situ sera étudiée au cas par cas [26].

IV.4.5 Les avantages

- C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton
- L'essai peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Et selon CHUNG ET LAW (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.
- ELVERY ET IBRAHIM et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage [32].

IV.5 Essai par Carottage

En vue d'effectuer des essais divers sur béton durci, le carottage par couronne diamantée procure un moyen intéressant d'investigation. Mais il est coûteux et souvent difficile à réaliser en raison de la proximité des armatures.

L'endroit carotté dépend du but de l'essai : on peut vouloir estimer la résistance d'une partie critique de la structure ou d'une partie que l'on présume endommagée par exemple par

le gel. On peut également chercher à avoir une valeur représentative de la totalité de la structure, auquel cas les endroits à carotter sont choisis de façon aléatoire. Le carottage peut aussi être utilisé pour détecter de la ségrégation ou la présence de nids d'abeille, pour vérifier l'adhérence aux joints de construction ou pour vérifier l'épaisseur du revêtement.

Les carottes sont prélevées à l'aide d'un carottier à diamant on obtient ainsi une éprouvette cylindrique qui contient parfois des morceaux d'armature et dont les extrémités ne sont généralement ni planes ni d'équerre. Conformément aux normes BS 1881 : partie 120 :1983 et les normes ASTM C 42-90, la carotte devrait être placée dans l'eau, surfacée et mise à l'essai de compression à l'état humide, alors que la norme ACI 318-89 (révisée en 1992) spécifie des conditions d'humidité correspondant aux conditions en service.

Selon les études japonaises S.Yamane, et Al (1979), les essais effectués dans des conditions sèches donnent des valeurs de résistance généralement plus élevées de 10% par rapport à celles observées sur des carottes mises à l'essai à l'état humide [33].



Figure IV.12: Carottage électrique à la couronne diamantée de 20 à 110 mm de diamètre[24]

En règle générale, l'extraction est réalisée par :

- un carottage vertical pour les dalles, les tabliers de ponts, les semelles et éventuellement pour les poutres de faible hauteur ;

-- un carottage horizontal dans l'âme des poutres de grande hauteur, dans le tiers central des poteaux, des murs, des piédroits [25]

IV.5.1 Facteurs influençant la résistance des carottes [34]

Les résultats des essais dépendent de plusieurs facteurs. Ces facteurs ont une influence directe sur la qualité du béton. Les essais par carottage sont généralement utilisés pour la détermination des propriétés du béton in situ à un certain âge tel que la résistance et la porosité. Le carottage peut être utilisé pour détecter la ségrégation ou la présence de nids d'abeilles, pour vérifier l'adhérence aux joints de construction ou pour vérifier l'épaisseur de revêtement. Les résultats obtenus par cet essai ont besoin d'une interprétation minutieuse, car la résistance du béton d'où il est prélevé dépend de :

- La qualité du béton
- L'emplacement dans la structure
- Condition de cure
- La température sur site

L'estimation de la résistance à la compression peut être obtenue conformément aux normes BS 1881, ou ASTM C42-90 ACI 318-89. Cette estimation dépend de :

- Du diamètre de la carotte
- Du rapport hauteur/diamètre de la carotte
- De la direction de prélèvement
- De la présence des armatures

IV.5.2 Diamètre

Le diamètre recommandé par BS 1881, partie 120, (1983) est de 100 mm ou 150 mm. Les carottes de petit diamètre sont généralement prévues pour donner des meilleurs résultats mais éparpillés. L'effet du diamètre sur la résistance a été rapporté dans le rapport N° 11 (Concrete Society Technical Report 11 "CSTR 11"), Bellander, Bungey, Ramirez et Barcena et Keiller

(1984). Les résultats obtenus par ces auteurs ont montré que la résistance n'est pas affectée par la taille des carottes avec de petits diamètres donnant des résultats variables pour un rapport hauteur/diamètre donné. Les recommandations spécifiant des carottes de diamètre des 100 mm ou 150 mm sont liées à la taille maximale des granulats utilisés. Le diamètre de la carotte doit être au moins trois fois la taille nominale des gros granulats [36].

IV.5.3 Résistances

La résistance des carottes prélevée d'une structure finie est, aussi, affectée par la présence des armatures. Elle est affectée par la direction, la quantité, et la position des armatures dans la carotte.

Par ailleurs et pour ne pas aller plus loin dans les détails, il est convenable de connaître certaines définitions liées aux essais par carottage;

- a) Résistance standard : c'est la résistance d'un spécimen de forme cubique, curé et testé en concordance avec une méthode standard tel que BS 1881.
- b) Résistance actuelle : la résistance actuelle estimée et définie comme étant la résistance d'un échantillon de béton prélevé d'un élément et testé en accord avec les procédures décrites par CSTR11 et BS 1881 [37]

$$[\text{Résistance institut estimé}] = \frac{D}{1.5+1/\lambda c} [\text{résistance à la compression de la carotte}]$$

Où:

D= 2.5 pour une carotte prélevée horizontalement

D= 2.3 " " " " verticalement

λc rapport de la longueur (après préparation) / diamètre

IV.5.4 Résistance potentielle

La résistance potentielle estimée est définie comme étant la résistance à la compression d'un béton frais, en accord avec la réglementation décrite au BS 1881. Le résultat est la valeur de la résistance estimée du béton d'un élément de structure exprimé en fonction de la résistance à la compression à 28 jours suivant les normes [37].

La résistance potentielle est donnée par la formule suivante :

Résistance potentielle = 1.3 x Résistance actuelle [24].

IV.6 Conclusion

Dans l'état actuel les habitudes d'évaluation de la qualité du béton dans les domaines de la construction, consistent à faire des essais destructifs à la compression ou la traction sur des éprouvettes (cubiques ou cylindriques). On a aussi recours à d'autres méthodes appelées essai non destructifs. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions par exemple méthode sclérométrique, d'auscultation et de carottage. Ainsi il y a un besoin énorme des outils efficaces de méthodes END d'évaluer les éléments en béton dans les structures. On le prévoit souvent dans ce point de technologie qu'un ingénieur devrait pouvoir faire quelques mesures sur le terrain rapide et pouvoir diagnostiquer l'état de la structure. Ceci peut être une réalité dans un proche avenir.

Chapitre V

**Caractérisation des matériaux
utilisés et formulation de béton**

V.1. Introduction

Dans cette partie nous allons déterminer les caractéristiques essentielles des différents constituants entrant dans la composition du béton et sa formulation. La connaissance de ces caractéristiques est primordiale à toute recherche ou étude, puisque chacune de ces caractéristiques peut influencer sur les résultats de l'étude.

V.2 Le ciment

Le ciment utilisé est le ciment portland au calcaire CEM II/B-L 42.5 (GICA) Sour El Ghozlane, conforme à la norme NA 442, dont les compositions chimique et minéralogique, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques sont présentées respectivement, le **tableau 3** montre les résultats que nous avons obtenus par l'observation de l'échantillon du ciment choisi.

V.3 Les granulats

V.3.1 Le sable

Les sables utilisés sont, **le sable grossi de lemhiretle sable fin de Boussaâda**. Après traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et d'analyse

Granulométrie suivants :

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparent	1.34	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.65	g/cm ³
Teneur en eau	0.17	%
Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparent	1.34	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.65	g/cm ³
Teneur en eau	0.17	%
SE	49	%

Tableau V.1 : Caractéristiques physiques.

V.3.1.1 Sable de Boussaâda

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE

Matériau : sable fin.

Masse sèche : 1000 gr.

Masse sèche après lavage : 948 gr.

Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé Rn (gr)	Retenu cumulé (%) (Rn/1000 × 100)	Passant (%) 100- (Rn/1000 × 100)
8			
6.3			
5			
2.5			
1.25	0	0	100
0.63	2	0.2	99.8
0.315	66	0.6	93.4
0.16	686	68.6	31.4
0.08	946	94.6	5.4
Fond de tamis	948	94.8	5.2

Tableau V.2 : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.



Figure V.1 : Tamis de système de vibration.

À partir des résultats de l'analyse granulométrique de **Sable de Boussaâda**, nous obtiendrons le module de finesse par la norme **NF EN 933-1** comme suit :

Module de finesse : $M_f = \frac{\text{refus sur tamis } 0.63, 0.315, 0.16, 0.08}{100} = 0.9$

V.3.1.2 Sable de lamhir :

Matériau : sable 0/3

Masse sèche : 1059.4 gr

Masse sèche après lavage : 967.2 gr

Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus cumulés	Pourcentage de refus cumulés	Pourcentage cumulés de tamisa
6.3	2.3	0.21	99.78
5	25.2	2.37	97.62
2.5	317.2	29.94	70.05
1.25	527.3	49.70	50.22
0.63	657.8	62.09	37.90
0.315	747.7	70.29	29.70
0.16	830.3	78.37	21.62
0.063	911.9	86.07	13.92

Tableau V.3: Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.80	T/m ³
Masse volumique absolue	2.68	T/m ³
Teneur en eau	0.13	%
SE	68.98	%

Tableau V.4 : Caractéristiques physiques.

À partir des résultats de l'analyse granulométrique du **Sable de lamhir**, nous obtiendrons le module de finesse par la norme **NF EN 933-1** comme suit :

Module de finesse : $Mf = \text{refus sur tamis } 6,3, 5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16, 0,063 / 100 = 2.93$.

On remarque que le sable de lamhir un module de finesse élevé (2.93), d'où la nécessité d'ajouter un sable de correction de Boussaâda.

V.3.1.3 Correction de sable :

La correction se fait selon la méthode **d'ABRAMS** dont la formule est la suivante :

Le module de finesse désiré soit fixé à $Mf = 2.80$

$$S1 = \frac{Mf_x - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} * 100$$

$$S2 = \frac{Mf_x - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} * 100$$

V.3.2 Le Gravier

Dans notre analyse nous avons utilisé trois type de gravier qui sont : le gravier 3/8 de lemhir le Gravier 8/15 de lemhir et Gravier 15/25 de lemhir :

V.3.2.1 Gravier 3/8 de lemhir

Masse volumique apparente	1.39	T/m ³
Masse volumique absolue	2.65	T/m ³
Los Angeles	22.36	%
Micro Deval	11.86	%

Tableau V.6 : caractéristiques physiques

a) Essais de Los Angeles : LA= 22.36%

b) Essais de Micro Deval : MD= 11.86%

Matériau : gravier 3/8

Masse sèche : gr 1992.7

Masse sèche après lavage : 1972.8gr

Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé Rn (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)	Numéro de Tamis
10	0	0	100	7240
8	164.3	8.24	91.75	7239
6.3	944.2	47.38	52.61	7238
5	1665.7	83.59	16.40	7237
4	1908.4	95.76	4.23	7236
2.5	1953.4	98.02	1.97	7234
1.25	1960.4	98.37	1.62	5242
0.630	1961.5	98.43	1.56	5245

Tableau V.5 : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.

V.3.2.2 Gravier 8/15 de lemhir :

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.47	T/m ³
Masse volumique absolue	2.6	T/m ³
Los Angeles	/	/
Micro Deval	/	/

Tableau V.6 : Caractéristiques physiques.

Matériau : gravier 8/15

Masse sèche : 3243.1 gr

Masse sèche après lavage : 3220.2 gr

Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)	N° De tamis
20	11.1	0.34	99.65	7243
16	130.7	4.03	95.96	7242
12.5	1005.7	31.01	68.98	2687
10	2304.8	71.06	28.93	7240
8	3009.7	92.80	7.19	7239
6.3	3204.3	98.80	1.19	7238
5	3211.1	99.01	0.98	7237

Tableau V.7 : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.

V.3.2.3 Gravier 15/25 de lemhir :

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.28	T/m ³
Masse volumique absolue	2.6	T/m ³
Los Angeles	/	/
Micro Deval	/	/

Tableau V.8 : Caractéristiques physiques.

Matériau : gravier 15/25

Masse sèche : 5192.1 gr

Masse sèche après lavage : 5166.9 gr

Diamètre des tamis (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
25	208.9	4.02	95.97
20	3067	59.07	40.92
16	4926.6	94.88	5.11
12.5	5156.9	99.32	0.67
10	5162.4	99.42	0.57

Tableau V.9 : Analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1.

V.4 Formulation des bétons

Pour définir un mélange optimal qui puisse assurer la résistance et la maniabilité désirée, nous avons utilisé la méthode de Faury qui est utilisée pour la formulation des bétons par le laboratoire central des travaux publics de Bouira. Pour tracer les courbes nous, avons utilisé l'Excel programmé.

V.4.1 La courbe de référence

Pour l'étude du béton, nous devons tracer la courbe de référence ; cette courbe caractérise le mélange optimal du béton ; elle passe par trois (03) points :

Chapitre V : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation de béton

1) Point O (0 ; 0) qui caractérise la réparation maximale du béton :

2) Point M (X ; Y) qui caractérise la réparation du béton en deux parties égales

a. Est celle où on retrouve les gros éléments et les éléments moyens du béton.

b. Est celle où on retrouve les éléments moyens et les éléments fins du béton.

3) Point B (Dmax ; 100%) qui est l'origine de la courbe, avec :

$$d1 = 25$$

$$d2 = 20$$

$$X = D_{\max}/2 = 25/2 = 12.5 \text{ mm}$$

$$Y = A + 17 D_{\max}$$

$$A = 35 ; = = 1.904$$

$$Y = 63.46\%$$

$$M (12.5 ; 63.46)$$

V.4.2 Dosage eau

$$I = k/D_{\max} = 0.36/1.904 = 0.189 \text{ litre}$$

Sachant que :

□ Kest obtenu du tableau de valeur d'après notre consistance de béton et la qualité des matériaux,

I : est l'indice des vides.

Le volume d'eau est donc :

$$V_{\text{eau}} = I - 1000 = 189 \text{ Litre}$$

- Quantité du béton frais 1000 L

- Quantité d'eau : 189L

Chapitre V : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation de béton

-Quantité de matière sèche : 811 L

V.4.3 Dosage du ciment

Dans notre étude, nous avons utilisé la quantité de 350 kg/m³.

Le volume du ciment est donc :

$$V = m/v = 350/3.1 = 113 \text{ L}$$

Le pourcentage du ciment nécessaire qu'on doit utiliser dans notre béton est :

$$\%C = VC_{\text{ciment}}/V.$$

$$\text{Matière sèche} * 100 = 113/811 * 100 = 13.93 = 14$$

Le pourcentage de gravier et de sable est donc:

$$\%G+S = 86\%$$

V.4.4 Pourcentage des grains dans le graphe

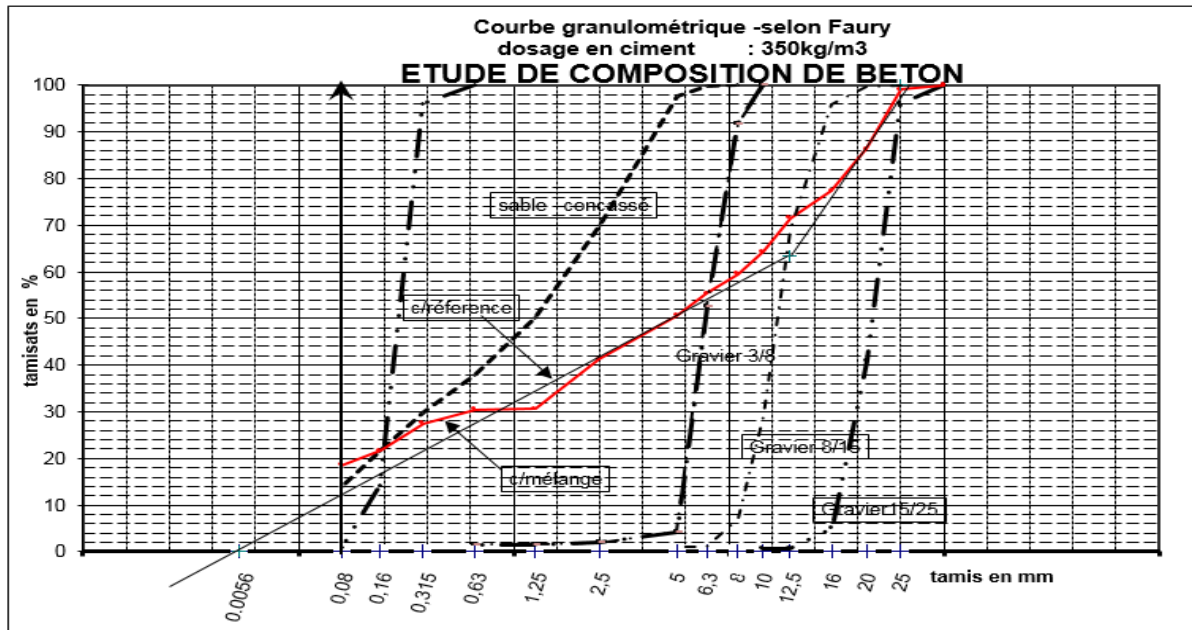
Le pourcentage nous permet de définir le volume de chaque matériau pour l'obtention d'un mélange optimale du béton (le dosage d'un mètre cube de béton).

Pourcentage des composants	Composition de béton (Kg/m³)
G15/25.....23%	$23 * 811 / 100 = 186.53$ $186.53 * 2.64 = 492.44 = 492$
G8/15.....18%	$18 * 811 / 100 = 145.98$ $145.98 * 2.6 = 379.55 = 380$
G3/8.....8%	$8 * 811 / 100 = 64.88$ $64.88 * 2.65 = 171.93 = 172$
Sable1 boussada4%	$4 * 811 / 100 = 32.44$ $32.44 * 2.68 = 86.94 = 87$
Sable2 lamhir.....33%	$33 * 811 / 100 = 267.63$ $267.63 * 2.68 = 717.25 = 717$

Ciment.....14 %	14*811/100=113.54 113.54*3.1=351.97=350
-----------------	--

Tableau V.10 : Composition d'un mètre cube de béton.

V.4.5 Le rapport E/C



$E/C=189/350=0.54$

V.4.6 Le rapport G/S

$G/S=1044/804=1.30$

V.4.7 Courbe granulométrique selon FAURY

Nous représentons les caractéristiques mécaniques des matériaux, l'analyse des composants du béton et la formulation, par une courbe de mélange présenté sur la figure V.2.

Figure V.2: courbe granulométrique selon FAURY.

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la méthode de FAURY, ainsi que la Détermination de la composition d'un mètre cube de béton ordinaire.

Dans ce chapitre aussi nous avons montré que les qualités d'un béton dépendent des caractéristiques de leurs constituants, en particulier, les granulats qui occupent environ 75% du

Chapitre V : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation de béton

volume total du béton. Ainsi que l'influence de dosage de ciment et l'eau sur la qualité de béton reste primordiale.

Chapitre VI

Partie expérimentale

VI. Essais de compression

Selon la norme **NF-EN-12390-3** on a met éprouvette cylindrique de diamètre de 16 cm et hauteur de 32 cm à la machine de presse dans notre laboratoire de faculté, la masse de l'éprouvette P2 et 15,510 kg avec une vitesse de montée en charge 0.02 MPA/s, et on a commencé l'essai jusqu'à la rupture pour voir la force de contrainte à la fonction de temps :

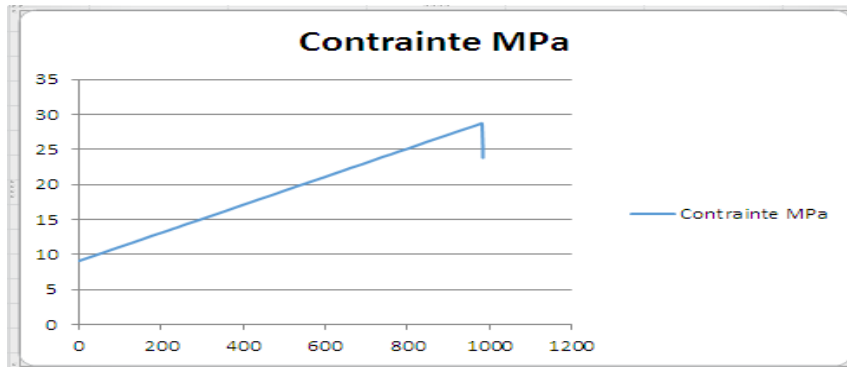


Figure VI.1 : Courbe de contrainte fonction de temps.

La contrainte d'écrasement augmente en fonction de temps.

La contrainte maxi d'écrasement est de 28.73 MPA au bout de 981.88 s où la rupture a été signalée.

VI.2 Control non destructive

Une éprouvette de dimension 16/32 est soumise à un effort de compression, lequel effort est appliqué à une vitesse minimale afin de prendre des mesures aisément à chaque niveau de contrainte. Les mesures sont prises avec un appareil ultra-son de marque PUNDITE modèle L 200 existant au niveau du laboratoire de Génie-Civil au sein de la faculté des sciences et sciences appliquées11 :



Figure VI.2: Appareille puntit L200.

VI.2.1 Le 1^{er} cas l'éprouvette à vide

Pour le premier cas l'éprouvette n'est pas chargée, tel que le signal est montré sur la figure ci-dessous :

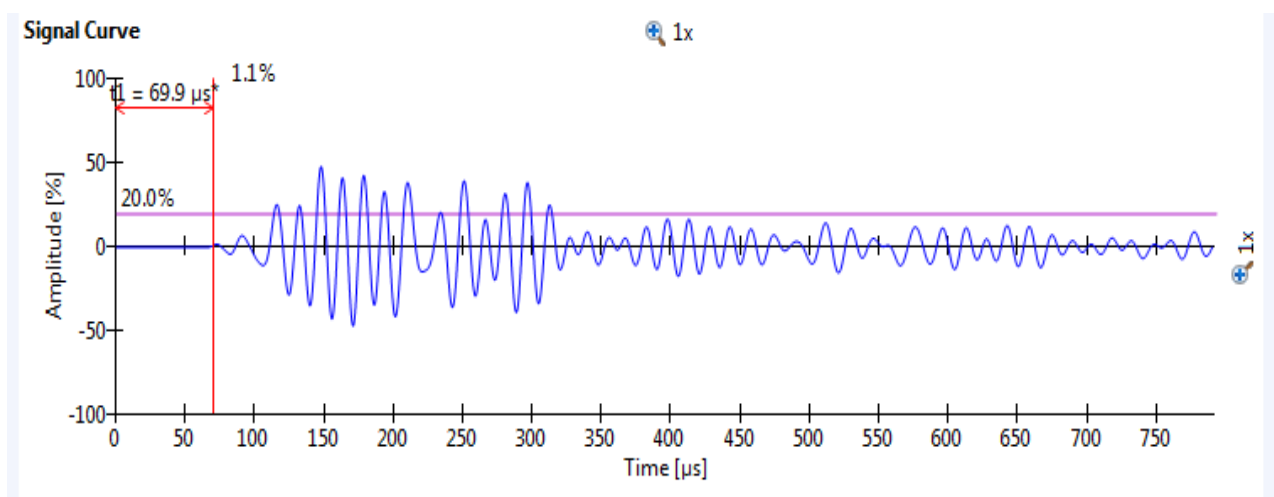


Figure VI.3 :Signal longitudinal à vie

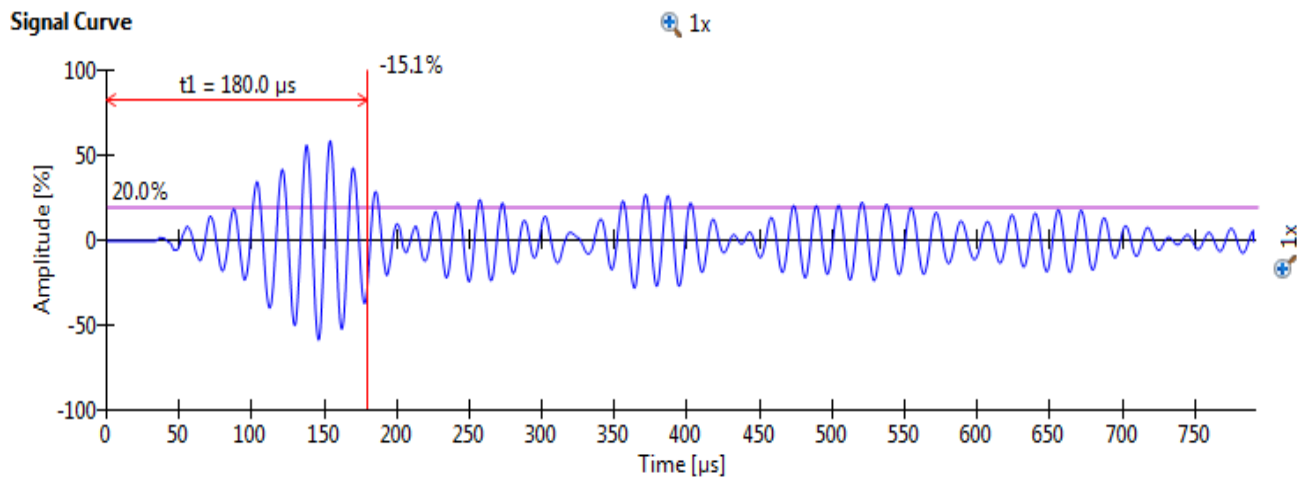


Figure VI. 3: Signal transversale à vide

On choisissait la cadence d'échantillonnage $T_e=0.4 \mu s$ et $F_e=1/T_e$ qui représente la fréquence de l'échantillonnage.

Et d'après le chercheur **Shannon**, la fréquence $F_e \geq 2f_{\max}$ tel que f_{\max} est la plus haute fréquence contenue dans notre signal.

Afin de créer la représentation fréquentielle du signal, on écrira un programme avec le logiciel Matlab qui va nous permettre de représenter la transformé de Fourier.

Avec :

- D : durée du signal, $D=N.T_e=N/F_e$
- N : nombre de points a considérés

On donnera un programme bien détaillé pour le premier cas. Et pour les autres cas on donne directement la transformé de Fourier.

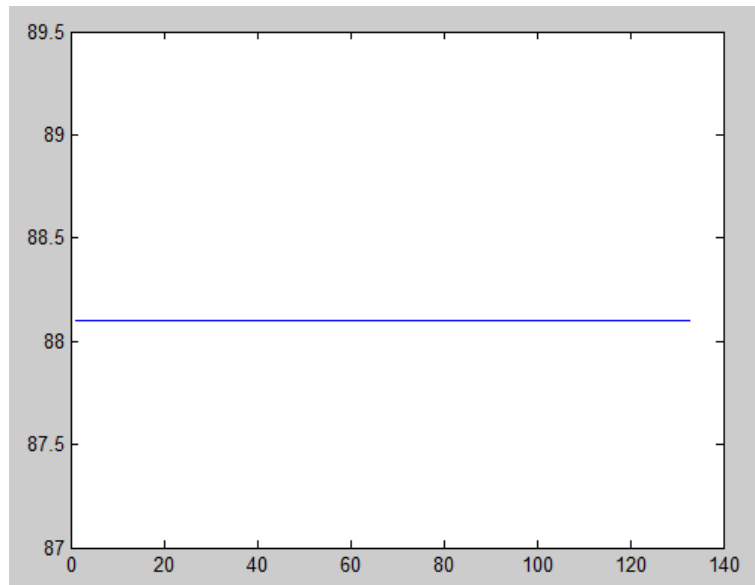


Figure VI.4 : La transformé de Fourier pour le 1er cas (éprouvette à vide)

On constate que la transformée de Fourier pour le cas de l'éprouvette à vide, ne donne aucune amplification, tel que l'amplitude maximal est 0.88 est pour les différentes valeurs de fréquences du signal.

Ce qui indique que l'éprouvette n'a subi aucune variation déformation et sa composition est homogène.

VI.2.2 le 2^{eme} cas : après chargement de l'éprouvette

Après chargement de l'éprouvette avec une variation de pas de la charge allant de 9MPa jusqu'au 28 Mpa , les signaux trouvés sont représentés sur les figures ci-dessous :

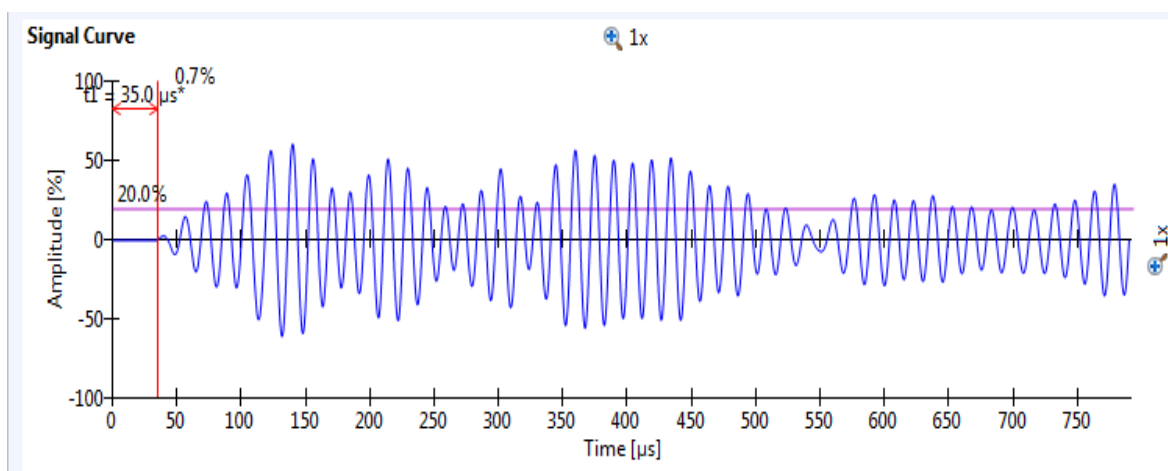


Figure VI.5 : Signal à 11 MPA

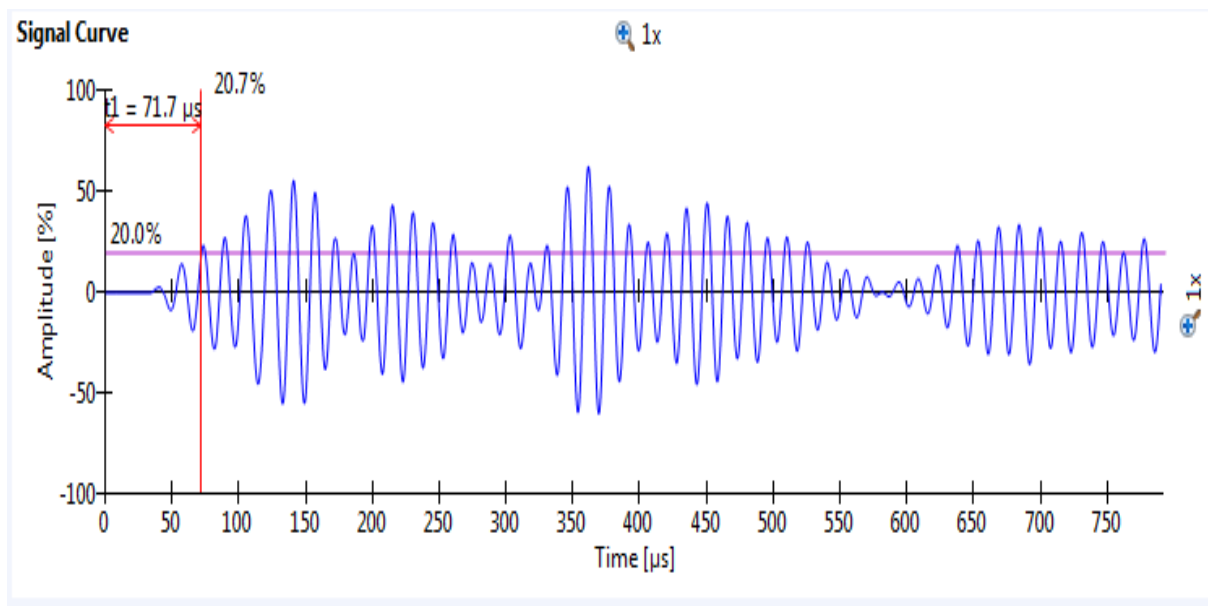


Figure VI. 6: Signal à 20 MPA

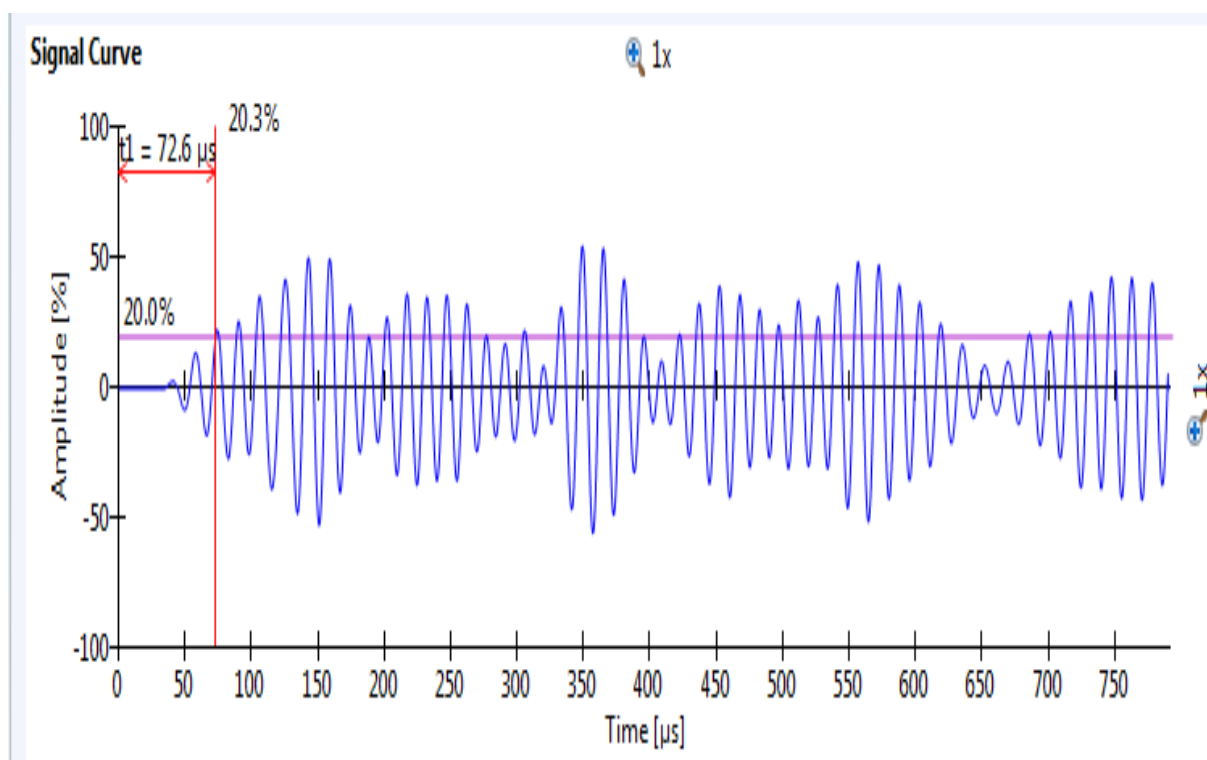


Figure 7: Signale à 24 MPA

VI.2.3 Le 3^{eme} cas après la rupture de l'éprouvette à 28.73

Après la rupture de l'éprouvette à la charge de 28.73 Mpa le signal trouvé est présenté sur la figure ci-dessous :

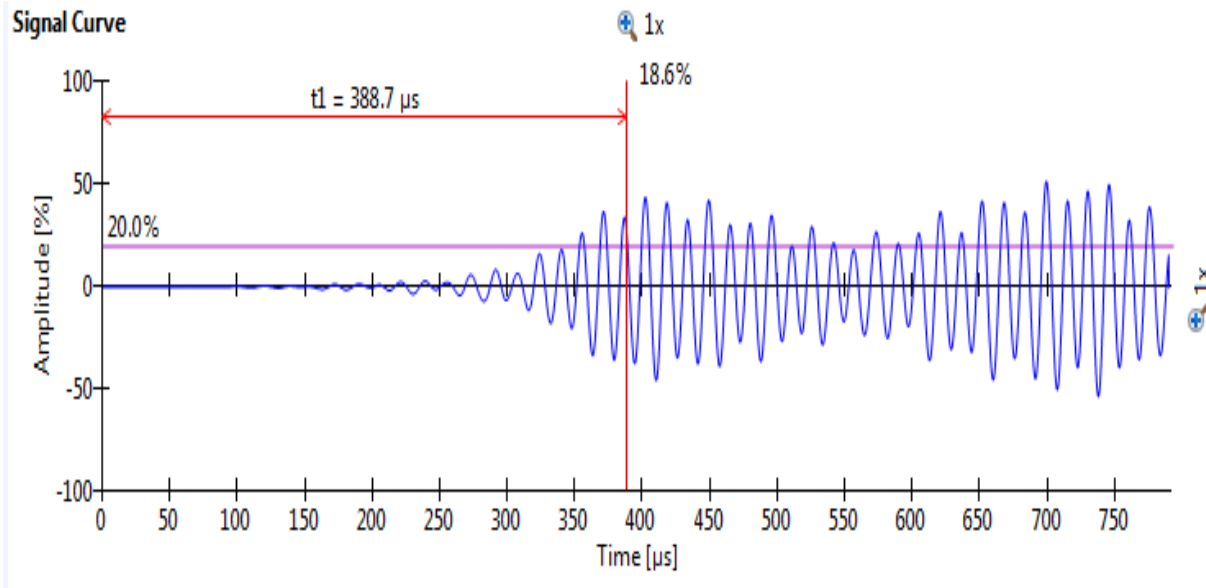


Figure VI.10 : Signale à la rupture 28.73

on remarque l'apparition d'un pic avec une fréquence de 35 1/ms-1, ce qui indique le développement des fissures à l'intérieur de l'éprouvette et le chut de la résistance (figure ci-dessous).

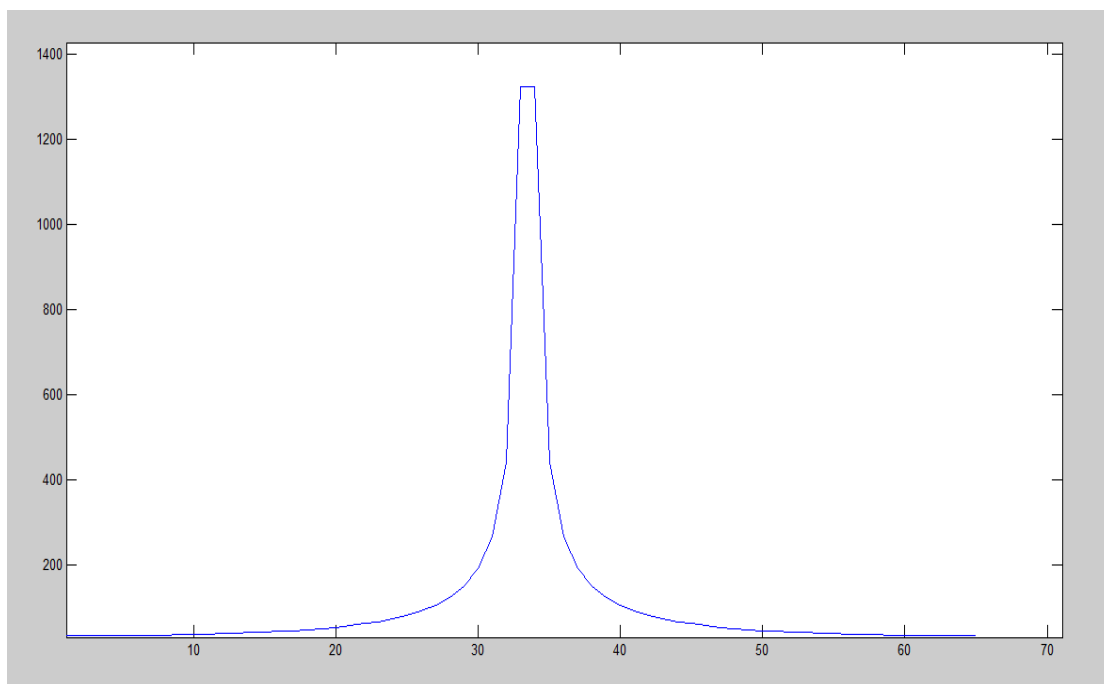


Figure VI.11: Fonction FFt du premier signal à la rupture

Conclusion générale

L'étude d'une éprouvette normalisée en compression par le contrôle non-destructif nous a permis de nous familiariser avec l'utilisation d'un appareil ultrason, les fonctionnalités ainsi que l'étalonnage au préalable.

L'acquisition des signaux pour chaque niveau de chargement est un travail laborieux néanmoins après plusieurs tentatives, on a recueilli les résultats tel qu'on a prévu . L'utilisation des méthodes de contrôle non-destructif servent généralement à déterminer les caractéristiques du matériau que ce soit au laboratoire ou sur site en mesurant la vitesse de propagation de l'onde émise, ces caractéristiques sont différentes d'un point à un autre et une étude sur plusieurs point est nécessaire pour fiabiliser les résultats mesurés.

Dans cette étude, on considère que le signal contient une profusion d'informations. Si le signal à un moment donné présente un pic, cela est dû à un défaut tel que la fissuration ou ségrégation ou excès de dosage d'un matériau et cela à vide sans aucun chargement; ce qui nous permettra de constituer une base de données et à l'avenir matérialiser ces résultats sous forme d'algorithme de reconnaissance de défauts et les localiser spatialement. L'étude menée se base sur la méthode des ondelettes.

Pour ce travail modeste, on a étudié des signaux longitudinaux et transversaux émis dans une éprouvette à vide, on a remarqué que le défaut est apparent dans le signal à un moment donné.

Les études suivantes permettront de constituer une base de données plus complètes des éprouvettes à différents stades de chargement.

Les références

- [1]- influence des différentes granulométries des agrégats sur le comportement mécanique de béton ordinaire RACHI LEILA DENDANI MOHAMED AMINE boumerdas 2016/2017.
- [2]-CIMBETON (2006); Les bétons: formulation, fabrication et mise en oeuvre, Paris.
- [3]-OUCHI M. (1999) ; State-of-the-art report on self-compactability evaluation, Concrete Engineering Series, N° 30, Japan, pp. 111-120.
- [4]-CHANVILLARD G., d'ALOIA L. (1994) ; Prédiction de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., 1994, 193, 39-51
- [5]- Conception d'un béton destiné aux ouvrages hydrotechniques Mr : AHMED Faycel (Avril-2015).
- [6]-TATERSALL G.H., BANFILL P.G.F. (1983) ; The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, London
- [7]-AFNOR. (2002) ; Béton et constituants du béton. Tome 1 : Spécifications du béton et de ces constituants, 5e édition, Paris, 431 p
- [8]- Norme Française P18-303, (1999), Eau de gâchage pour béton, Éditions AFNOR, Paris, 1999
- [9]-DE LARRARD F. (2000); Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.
- [10]- NEVILLE A.M. (2000) ; Propriétés des bétons, ed. CRIB., Paris, Eyrolles, 806 p
- [11]- -NGUYEN T.L.H. (2007) ; Outils pour la modélisation de la mise en oeuvre des bétons, Thèse de Doctorat à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 139 p
- [12] ADAM M. Neville. « Propriétés de béton ». Eyrolles Paris, 2000.
- [13]- Caractérisation du comportement en traction du béton sous fortes sollicitations Essais de flexion trois points aux barres de Hopkinson par Xavier RÉGAL 12 février 2016 France.
- [14]J. M. Sganzi, Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions: avec des applications tirées spécialement de l'art de l'Ingénieur des ponts et chaussées.

- [15] R. Vittone, Bâtir : manuel de la construction, PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [16] livres de guides des bétons
- [17] DEGRADATIONS AU NIVEAU DE L'USINE ALZINC CONSTATS ET RECOMMANDATIONS par Mohammed Salim KAOUADJI 18/04/ 2013
- [18] Duval R. La durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives. 1992. pp, 391.
- [19] Michel (L.), Pathologie, diagnostic, prévention et maintenance des structures. 2012. pp11
- [20] Méthodologie based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life. l'industria italiana del cemento N° 764, pp 330-339 [Andrade (c.), et al 2001]
- [21] BARON J., OLLIVIER J. -P. – La durabilité des bétons, Presses des Ponts et Chaussée, 1992.
- [22] Belhachemi (B.), et Hassaine (N.), Etude d'un milieu agressif acide sur un mortier à base de ciment 2012.
- [23] Wilson, 1975.
- [24] H Belaribi , essai non destructive thèse université biskra 2007
- [25] Samia Hannachi EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON SUR SITE : APPLICATION DE LA METHODE COMBINEE 28 J 2015
- [26] Yagoubi Messaoud Essaghir. Étude de caractérisation et corrélation aux moyens des essais non-destructifs (NDT) et essai direct d'un béton à haute performance (BHP) à base de matériaux locaux. 2015/2016.
- [27] CHAMBART, 2009
- [28] BEINISH, 2000
- [29] LI and WONG, 2013
- [30] FELDMAN (1977).

[31] NEVILLE (2000).

[32] ELVERY ET IBRAHIM (1976)

[33] Les études japonaises S. Yamane, et Al (1979)

[34] mellas (2003)

[35] BS 1881, partie 120, (1983)

[36] Bellander (1976), Bungey (1979)

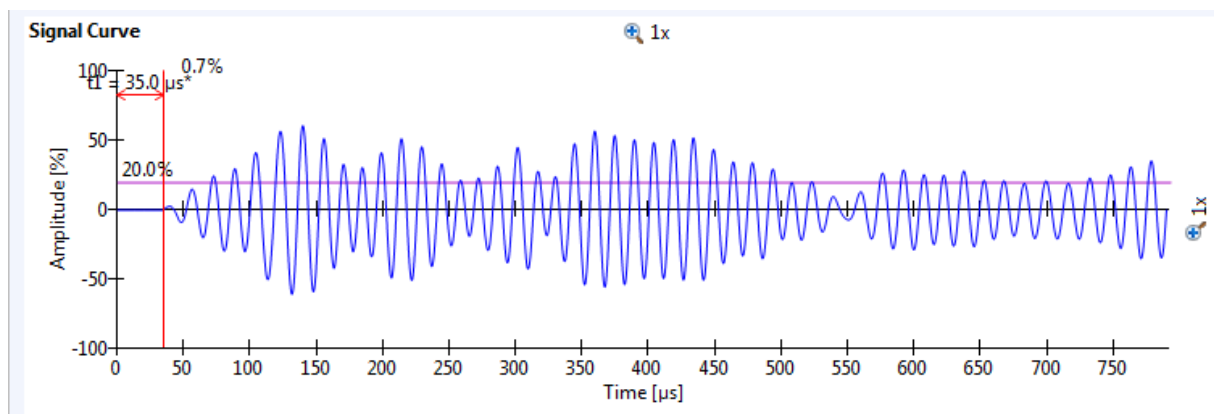
[37] BS 1881 (1983).

Annexes

Composition de 3 éprouvettes en m³

Composant	Ciment Kg/m ³	Eau(L)	Sable 1 boussadaa (kg)	Sable 2 lamhir (kg)	G3/8 (kg)	G8/15 (kg)	G15/25 (kg)
Béton 1	350	189	87	717	172	380	492
Béton 2	350	189	87	717	172	380	492
Béton 3	350	189	87	717	172	380	492

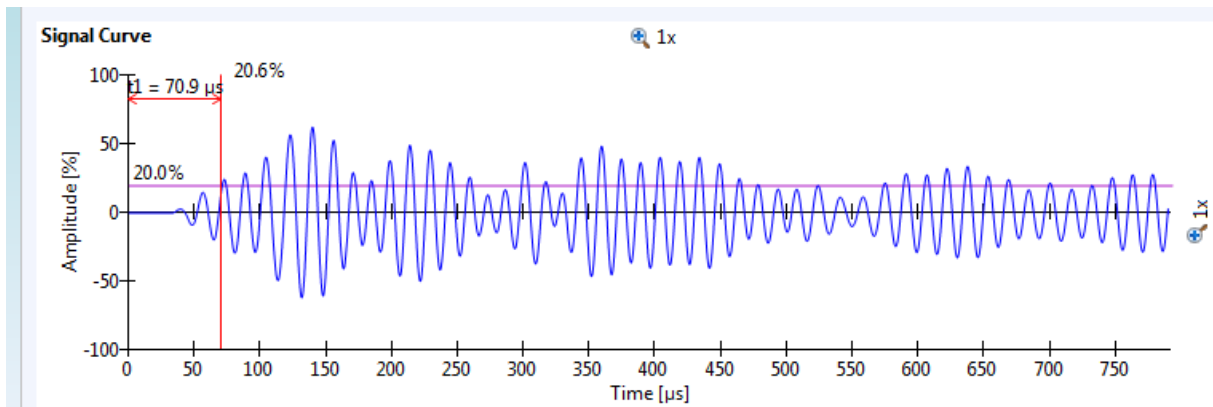
Signal de transversale au 9 MPA :



Tableaux des valeurs de signal transversale a 9 MPA :

T(Ms)	0	5	15	30	35	40	45	50	55
Amplitude%	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	2.8	-4.7	-6.1	14.1
T(Ms)	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Amplitude%	-0.9	-18.9	16.3	10.6	-29.2	8.8	22.3	-28	6.4
T(Ms)	105	110	115	120	125	130	135	140	145
Amplitude%	38.8	-27.4	-39.2	35.9	37.6	53.6	-7.8	59.3	-36.5
T(Ms)	150	155	160	165	170				
Amplitude%	-32.1	51	-14.6	-24.5	33.1				

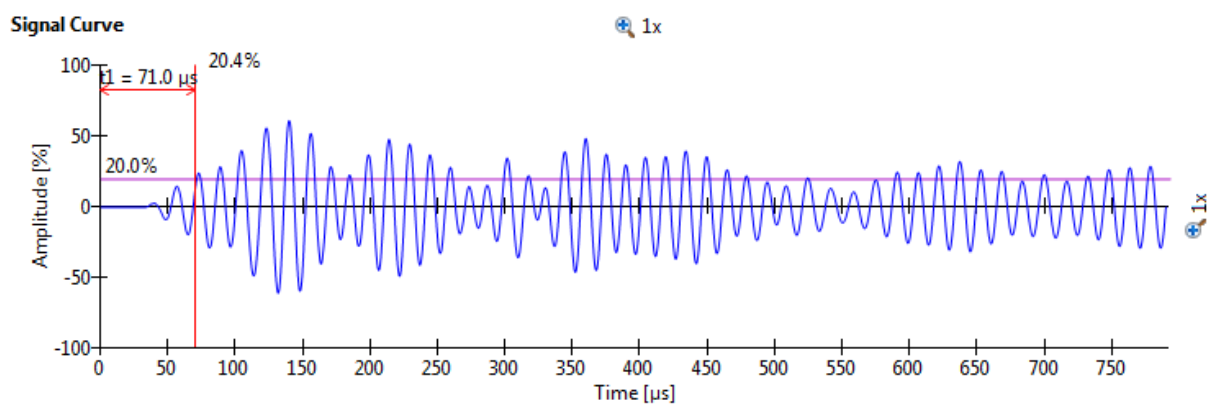
Signale de transversale a 12 MPA :



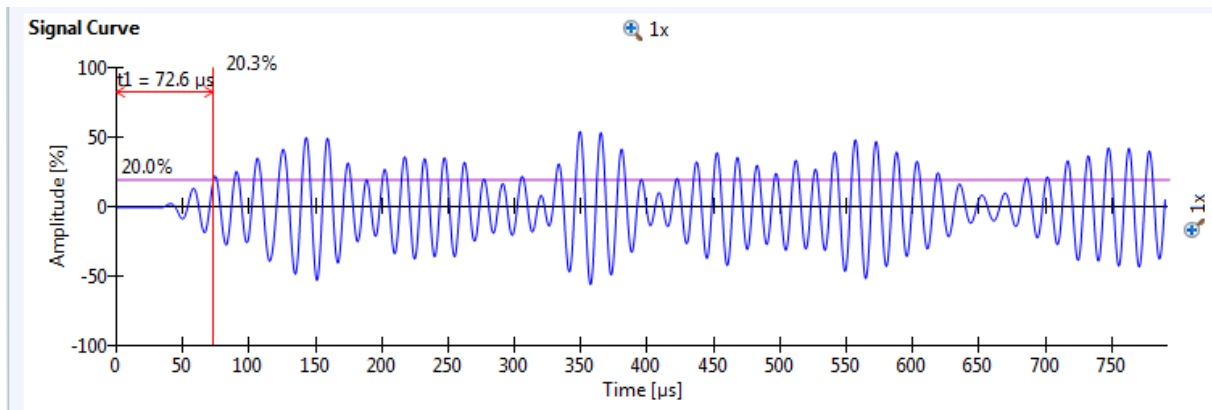
Tableaux des valeurs de signale transversale a 12 MPA :

T(Ms)	0	5	15	30	35	40	45	50	55
Amplitude%	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	2.8	-4.5	-5.8	13.9
T(Ms)	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Amplitude%	1.2	-18.9	15.4	11.4	-28.7	7	22.7	-26.5	4.9
T(Ms)	105	110	115	120	125	130	135	140	145
Amplitude%	38.4	-28.4	-38.5	38.5	36.5	-55.4	-8.2	60.3	-36.8
T(Ms)	150	155	160	165	170				
Amplitude%	-30.8	52	-6.7	-27	29.3				

Signale de transversale a 14 MPA :



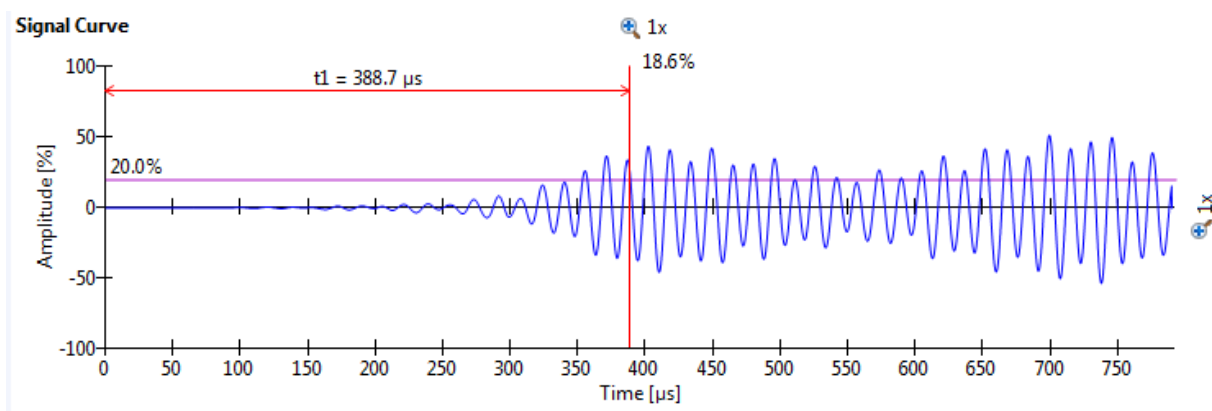
Signale de transversale à 24 MPA :



Tableaux des valeurs de signale transversale à 24 MPA :

T(Ms)	0	5	15	30	35	40	45	50	55
Amplitude%	0	0.1	0	0.1	0.3	2.7	-1.9	-7.9	9
T(Ms)	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Amplitude%	7.4	-17.2	3.6	20	-19.9	-10.6	25.8	-11.7	-13.4
T(Ms)	105	110	115	120	125	130	135	140	145
Amplitude%	34.3	0.9	-38.6	1.4	41.8	-5.9	-45.3	31.2	26.4
T(Ms)	150								
Amplitude%	-51.4								

Signale de transversale a la rupture 28 MPA :



Tableaux des valeurs de signale transversale a la rupture 28 MPA :

T(Ms)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
Amplitude%	0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.5	-0.9
T(Ms)	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Amplitude%	-1.2	-0.1	2.4	2.7	-0.8	-5.5	-5.8	5.5	18.1
T(Ms)	360	380	400	420	440	460	480	500	520
Amplitude%	-14.8	-31.7	31.9	26.8	-35.6	-9.7	30	-9.4	-12.2
T(Ms)	540								
Amplitude%	18.1								



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر

GRUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
SOCIETE DES CIMENTS DE SOUR EL GHOZLANE

« S.C.S.E.G. »

S.P.A. au capital social de : 1.900.000.000 D A : ش.ذ.أ. - رأسمالها الإجمالي :



N° Identification Fiscale : 099 810 028 210 584 - N° Article d'imposition : 10 38 52 58 011 - N° Registre de Commerce : 10/00-0262105898

Produit Commercialisé :
Ciment CEM II /A-M (P-L) 42.5 N

Fiche technique

Période D'expédition :
Avril -Mai 2019 -

Conformément à la norme NA 442 édition 2013

Caractéristique physico-mécaniques				Composition chimique		
Désignations	Unités	Exigence	Moyenne	Composé	Exigence	Moyenne (%)
Poids spécifique	Gr/cm ³		3.09	SiO ₂		20.06
Surface spécifique Blaine	Cm ² /gr		4000	Al ₂ O ₃		3.99
Consistance normale	% H ₂ O		26.11	Fe ₂ O ₃		3.04
Temps de prise	Début	Min. ≥ 60	151	CaO		61.57
	Fin	Min.	322			
Expansion à chaud	mm	≤ 10	2.79	MgO		1.62
Chaleur d'hydratation à (41h)	(j/g)	270	238.8	K ₂ O		0.54
Refus sur tamis 45 µm	%		15.58	Na ₂ O		0.26
Résistance à la flexion	02 jours	Mpa	4.56	SO ₃	≤ 3.50	2.06
	07 jours	Mpa	6.12	Cl	≤ 0.10	< 0.01
	28 jours	Mpa	6.92	P.A.F à 1000 ° C		7.16
Résistance à la compression	02 jours	Mpa	≥ 10.00	CaO _{libre}		1.56
	07 jours	Mpa				
	28 jours	Mpa	Li ≥ 42.5 Ls ≤ 62.5		---	---

Observation : c'est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques satisfont aux exigences du ciment CEM II / A-M (P-L) 42.5N Selon la norme NA 442/2013.

Société des Ciments Sour El Ghozlane
Siège : Col de Becouche BP 61, Sour El Ghozlane
(W) de Bouira, 10004 Algérie
E-Mail : bodg-scseg@scseg.dz

Le chef de Département

Le programme :

N : nombre de pts a considérés ; D : durée de signal ; ampl : amplitude de signal

$T_e=0,4\mu s$ et $F_e=1/T_e=2.5$ 1/S-1

```
>> N=0:160;
```

```
>> D=64;
```

```
>> t=0:0.4 :0.67 ;
```

```
>> ampl1=0.1 ;
```

```
>> ampl2=0.2 ;
```

```
>> ampl3=1.2 ;
```

```
>> ampl4=1.9 ;
```

```
>> ampl5=1.4 ;
```

```
>> ampl6=0 ;
```

```
>> ampl7=-1.6 ;
```

```
>> ampl8=-3.2 ;
```

```
>> ampl9=-4 ;
```

```
>> ampl10=-2.6 ;
```

```
>> ampl11=0.9 ;
```

```
>> ampl12=4.7 ;
```

```
>> ampl13=6.9 ;
```

```
>> ampl14=6.3 ;
```

```
>> ampl15=3.6 ;
```

```
>> ampl16=0.7 ;
```

```
>> ampl17=-2.6 ;
```

```
>> ampl18=-5.9 ;  
>> ampl19=-8.3 ;  
>> ampl20=-10 ;  
>> ampl21=-10.6 ;  
>> ampl22=-8.4 ;  
>> ampl23=-0.9 ;  
>> ampl24=11 ;  
>> ampl25=22.2 ;  
>> ampl26=25.2 ;  
>> ampl27=16.6 ;  
>> ampl28=16.6 ;  
>> ampl29=-0.8 ;  
>> ampl30=-19 ;  
>> ampl31=-28.1 ;  
>> ampl32=-22.2 ;  
>> ampl33=-3.7 ;  
>> ampl34=16.7 ;  
>> ampl35=24.9 ;  
>> ampl36=14.6 ;  
>> ampl37=-8.3 ;  
>> ampl38=-29.2 ;  
>> ampl39=-33.8 ;  
>> ampl40=-16.6 ;
```

```
>> ampl41=14.2 ;  
>> ampl42=41 ;  
>> ampl43=47 ;  
>> ampl44=27.1 ;  
>> ampl45=-7.9 ;  
>> ampl46=6.3 ;  
>> ampl47=-36.5 ;  
>> ampl48=-40.8 ;  
>> ampl49=-18.8 ;  
>> ampl50=14.9 ;  
>> ampl51=38.6 ;  
>> ampl52=38.6 ;  
>> ampl53=-25 ;  
>> ampl54=-45.7 ;  
>> ampl55=-38.3 ;  
>> ampl56=-7.3 ;  
>> ampl57=26.6 ;  
>> ampl58=42.7 ;  
>> ampl59=32.3 ;  
>> ampl60=3.3 ;  
>> ampl61=-24.6 ;  
>> ampl62=-34.2 ;  
>> ampl63=-20.1 ;
```

```
>> ampl64=42.7 ;
```

```
>>
```

```
x=ampl1*cos(2*pi*2.5*t)+ampl2*cos(2*pi*2.5*t)+ampl3*cos(2*pi*2.5*t)+ampl4*cos(2*pi*2.5*t)+ampl5*cos(2*pi*2.5*t)+ampl6*cos(2*pi*2.5*t)+ampl7*cos(2*pi*2.5*t)+ampl8*cos(2*pi*2.5*t)+ampl9*cos(2*pi*2.5*t)+ampl10*cos(2*pi*2.5*t)+ampl11*cos(2*pi*2.5*t)+ampl12*cos(2*pi*2.5*t)+ampl13*cos(2*pi*2.5*t)+ampl14*cos(2*pi*2.5*t)+ampl15*cos(2*pi*2.5*t)+ampl16*cos(2*pi*2.5*t)+ampl17*cos(2*pi*2.5*t)+ampl18*cos(2*pi*2.5*t)+ampl19*cos(2*pi*2.5*t)+ampl20*cos(2*pi*2.5*t)+ampl21*cos(2*pi*2.5*t)+ampl22*cos(2*pi*2.5*t)+ampl23*cos(2*pi*2.5*t)+ampl24*cos(2*pi*2.5*t)+ampl25*cos(2*pi*2.5*t)+ampl26*cos(2*pi*2.5*t)+ampl27*cos(2*pi*2.5*t)+ampl28*cos(2*pi*2.5*t)+ampl29*cos(2*pi*2.5*t)+ampl30*cos(2*pi*2.5*t)+ampl31*cos(2*pi*2.5*t)+ampl32*cos(2*pi*2.5*t)+ampl33*cos(2*pi*2.5*t)+ampl34*cos(2*pi*2.5*t)+ampl35*cos(2*pi*2.5*t)+ampl36*cos(2*pi*2.5*t)+ampl37*cos(2*pi*2.5*t)+ampl38*cos(2*pi*2.5*t)+ampl39*cos(2*pi*2.5*t)+ampl40*cos(2*pi*2.5*t)+ampl41*cos(2*pi*2.5*t)+ampl42*cos(2*pi*2.5*t)+ampl43*cos(2*pi*2.5*t)+ampl44*cos(2*pi*2.5*t)+ampl45*cos(2*pi*2.5*t)+ampl46*cos(2*pi*2.5*t)+ampl47*cos(2*pi*2.5*t)+ampl48*cos(2*pi*2.5*t)+ampl49*cos(2*pi*2.5*t)+ampl50*cos(2*pi*2.5*t)+ampl51*cos(2*pi*2.5*t)+ampl52*cos(2*pi*2.5*t)+ampl53*cos(2*pi*2.5*t)+ampl54*cos(2*pi*2.5*t)+ampl55*cos(2*pi*2.5*t)+ampl56*cos(2*pi*2.5*t)+ampl57*cos(2*pi*2.5*t)+ampl58*cos(2*pi*2.5*t)+ampl59*cos(2*pi*2.5*t)+ampl60*cos(2*pi*2.5*t)+ampl61*cos(2*pi*2.5*t)+ampl62*cos(2*pi*2.5*t)+ampl63*cos(2*pi*2.5*t)+ampl64*cos(2*pi*2.5*t) ;
```

```
>> fft(x)
```

```
ans =
```

```
1.0e+03 *
```

```
Columns 1 through 4
```

```
0.0320 + 0.0000i  0.0320 + 0.0015i  0.0320 + 0.0031i  0.0320 + 0.0047i
```

Columns 5 through 8

$0.0320 + 0.0063i$ $0.0320 + 0.0079i$ $0.0320 + 0.0095i$ $0.0320 + 0.0113i$

Columns 9 through 12

$0.0320 + 0.0130i$ $0.0320 + 0.0149i$ $0.0320 + 0.0168i$ $0.0320 + 0.0188i$

Columns 13 through 16

$0.0320 + 0.0210i$ $0.0320 + 0.0232i$ $0.0320 + 0.0257i$ $0.0320 + 0.0283i$

Columns 17 through 20

$0.0320 + 0.0312i$ $0.0320 + 0.0344i$ $0.0320 + 0.0379i$ $0.0320 + 0.0419i$

Columns 21 through 24

$0.0320 + 0.0464i$ $0.0320 + 0.0515i$ $0.0320 + 0.0575i$ $0.0320 + 0.0647i$

Columns 25 through 28

$0.0320 + 0.0735i$ $0.0320 + 0.0844i$ $0.0320 + 0.0985i$ $0.0320 + 0.1175i$

Columns 29 through 32

$0.0320 + 0.1448i$ $0.0320 + 0.1874i$ $0.0320 + 0.2635i$ $0.0320 + 0.4406i$

Columns 33 through 36

$0.0320 + 1.3239i$ $0.0320 - 1.3239i$ $0.0320 - 0.4406i$ $0.0320 - 0.2635i$

Columns 37 through 40

$0.0320 - 0.1874i$ $0.0320 - 0.1448i$ $0.0320 - 0.1175i$ $0.0320 - 0.0985i$

Columns 41 through 44

$0.0320 - 0.0844i$ $0.0320 - 0.0735i$ $0.0320 - 0.0647i$ $0.0320 - 0.0575i$

Columns 45 through 48

$0.0320 - 0.0515i$ $0.0320 - 0.0464i$ $0.0320 - 0.0419i$ $0.0320 - 0.0379i$

Columns 49 through 52

0.0320 - 0.0344i 0.0320 - 0.0312i 0.0320 - 0.0283i 0.0320 - 0.0257i

Columns 53 through 56

0.0320 - 0.0232i 0.0320 - 0.0210i 0.0320 - 0.0188i 0.0320 - 0.0168i

Columns 57 through 60

0.0320 - 0.0149i 0.0320 - 0.0130i 0.0320 - 0.0113i 0.0320 - 0.0095i

Columns 61 through 64

0.0320 - 0.0079i 0.0320 - 0.0063i 0.0320 - 0.0047i 0.0320 - 0.0031i

Column 65

0.0320 - 0.0015i

```
>> plot(f,abs(x))
```

```
>> x=fft(x);
```

```
length(x)
```

ans =

65

>> x(6:65)

ans =

1.0e+03 *

Columns 1 through 4

0.0320 + 0.0079i 0.0320 + 0.0095i 0.0320 + 0.0113i 0.0320 + 0.0130i

Columns 5 through 8

0.0320 + 0.0149i 0.0320 + 0.0168i 0.0320 + 0.0188i 0.0320 + 0.0210i

Columns 9 through 12

0.0320 + 0.0232i 0.0320 + 0.0257i 0.0320 + 0.0283i 0.0320 + 0.0312i

Columns 13 through 16

$$0.0320 + 0.0344i \quad 0.0320 + 0.0379i \quad 0.0320 + 0.0419i \quad 0.0320 + 0.0464i$$

Columns 17 through 20

$$0.0320 + 0.0515i \quad 0.0320 + 0.0575i \quad 0.0320 + 0.0647i \quad 0.0320 + 0.0735i$$

Columns 21 through 24

$$0.0320 + 0.0844i \quad 0.0320 + 0.0985i \quad 0.0320 + 0.1175i \quad 0.0320 + 0.1448i$$

Columns 25 through 28

$$0.0320 + 0.1874i \quad 0.0320 + 0.2635i \quad 0.0320 + 0.4406i \quad 0.0320 + 1.3239i$$

Columns 29 through 32

$$0.0320 - 1.3239i \quad 0.0320 - 0.4406i \quad 0.0320 - 0.2635i \quad 0.0320 - 0.1874i$$

Columns 33 through 36

$$0.0320 - 0.1448i \quad 0.0320 - 0.1175i \quad 0.0320 - 0.0985i \quad 0.0320 - 0.0844i$$

Columns 37 through 40

$0.0320 - 0.0735i$ $0.0320 - 0.0647i$ $0.0320 - 0.0575i$ $0.0320 - 0.0515i$

Columns 41 through 44

$0.0320 - 0.0464i$ $0.0320 - 0.0419i$ $0.0320 - 0.0379i$ $0.0320 - 0.0344i$

Columns 45 through 48

$0.0320 - 0.0312i$ $0.0320 - 0.0283i$ $0.0320 - 0.0257i$ $0.0320 - 0.0232i$

Columns 49 through 52

$0.0320 - 0.0210i$ $0.0320 - 0.0188i$ $0.0320 - 0.0168i$ $0.0320 - 0.0149i$

Columns 53 through 56

$0.0320 - 0.0130i$ $0.0320 - 0.0113i$ $0.0320 - 0.0095i$ $0.0320 - 0.0079i$

Columns 57 through 60

0.0320 - 0.0063i 0.0320 - 0.0047i 0.0320 - 0.0031i 0.0320 - 0.0015i

```
>> x_mag=abs(x);
```

```
x_mag(6:65)
```

```
ans =
```

1.0e+03 *

Columns 1 through 9

0.0330 0.0334 0.0339 0.0346 0.0353 0.0361 0.0371 0.0383 0.0396

Columns 10 through 18

0.0410 0.0428 0.0447 0.0470 0.0496 0.0527 0.0563 0.0606 0.0658

Columns 19 through 27

0.0722 0.0801 0.0902 0.1036 0.1218 0.1483 0.1901 0.2655 0.4418

Columns 28 through 36

1.3243 1.3243 0.4418 0.2655 0.1901 0.1483 0.1218 0.1036 0.0902

Columns 37 through 45

0.0801 0.0722 0.0658 0.0606 0.0563 0.0527 0.0496 0.0470 0.0447

Columns 46 through 54

0.0428 0.0410 0.0396 0.0383 0.0371 0.0361 0.0353 0.0346 0.0339

Columns 55 through 60

0.0334 0.0330 0.0326 0.0323 0.0322 0.0320

>> plot(x_mag)