

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



Faculté des Sciences et des sciences appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

Abdellaoui Kheira Rania
Boulenouar Karima

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

Filière : Génie Civil

Option : Structures

Thème :

**DETECTION ET PROPAGATION DES FISSURS DANS UNE
EPROUVETTE DE BETON SOUMISE A LA COMPRESSION PAR LA
METHODE DES ONDELETTES**

Dirigé par :

Arbaoui Ahcene

Année Universitaire 2020/2021



REMERCIEMENT

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur ARBAOUI, enseignant à l'université de BOUIRA pour nous avoir suivi durant la réalisation de ce modeste travail, les conseils qu'il nous a prodigué, pour la confiance qu'il nous a accordée, sa disponibilité et la patience dont il a fait preuve nous a été d'un apport précieux pour l'accomplissement de ce travail. On remercie tous les enseignants du département de GENIE-CIVIL pour leur rôle important dans notre formation



Dédicaces

A mes très chers parents, source de vie,

D'amour et d'affection

A mes chers frères et leurs enfants, tout particulièrement mon frère

***RABEH** source de joie et de bonheur*

*A mon petit prince **ISHAK***

A toute ma famille, source d'espoir et motivation

A tous mes amis et chère amis avant d'être binôme

KARIMA



Dédicace

Avant toute chose, je tiens à remercier Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la force et la patience afin de réaliser ce modeste travail que je dédie particulièrement à :

***Mon père** comme témoignage de ma reconnaissance pour ses efforts dont je serais toujours redevable et l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de m'aider pour mes études*

***Ma chère mère** adorée qui s'est sacrifiée pour mon éducation et ma réussite et de lui dire que tu as été pour moi ma meilleure école et mon meilleur professeur, " **MERCI**" pour toutes les valeurs que tu m'as inculquées*

*A mes adorables frères : **AMINE, YAKOUB** et mes très chères sœurs : **ATIKA, AMIRA** et surtout mon prince **AMIR** et ma princesse **TANIA***

*A mes beaux-frères **RIAD, OMAR***

*A mon fiancé **MOHAMED** pour ses encouragements et sa patience durant la période de mes études*

*A mes tantes : **NADIA, FOUZIA, AKILA, LAMIA** et mes oncles : **AMAR, FARES***

*A mes cousines : **AIDA ABIR NADIA HIBA** et ma jolie **LYLY***

*A mes cousins : **OUSSAMA, AYOUB, AMAR, WASSIM, RAMI, MOHAMED, ABDENOUR***

*A toute ma belle-famille **BENSALEM**, Ma **belle-mère** mon **beau père** mes belles sœurs : **AMRA, FARIHA, RAHMA, SABRINA** et mon beau-frère **BELKACEM** et mes poussins : **ABDERAHMANE, SLIMANE, NOUR, HIBA***

A tous les membres de ma famille du grand au petit sans exception

A tous ceux qui m'ont soutenue et aidée pour la réalisation de ce modeste travail et tous ceux qui me sont chers.

RANIA

Résumé

L'objectif de ce travail est l'utilisation de nouveaux procédés d'auscultation du matériau béton par le biais de méthodes non-destructives. Les méthodes et procédés de vérification de la qualité du béton communément utilisés et sont toujours en application sont aussi les méthodes destructives à savoir le prélèvement des éprouvettes témoins et sous l'essai de compression on vérifie à fortiori le niveau de résistance du béton et on prend une décision sur le résultat uniquement de la valeur de cette résistance qui ne doit pas être au-dessous d'une certaine valeur sécuritaire. Dans notre démarche, hormis le niveau de résistance de l'éprouvette, on constitue une base de données de signaux recueillis durant l'application de la force de compression et ce à chaque niveau de chargement avec un pas de 1KN en réduisant au minimum la vitesse de chargement (0.01 KN/S). Les signaux feront l'objet d'une analyse par ondelettes avec le logiciel MATLAB afin de reconstituer la texture de la section au niveau central de l'éprouvette. Ce premier pas dans la réalisation de l'essai nous permet d'avoir des informations sur la morphologie de la section et détecter le début des fissures et leur évolution.

Abstract

The objective of this work is the use of new methods of auscultation of the concrete material by means of non-destructive methods. the methods and procedures for verifying the quality of the concrete commonly used and are still in application are also the destructive methods, namely the sampling of the witness samples and under the compression test the level of resistance of the concrete is checked a fortiori and one takes a decision on the result only of the value of this resistance which must not be below a certain safe value. in our approach, apart from the level of resistance of the test piece, a database of signals collected during the application of the compressive force is established at each level of loading with a step of 1KN reducing the speed to a minimum load (0.01 KN / S). the signals will be the subject of a wavelet analysis with the MATLAB software in order to reconstitute the texture of the section at the central level of the test piece. this first step in the realization of the test allows us to have information on the morphology of the section and to detect the beginning of cracks and their evolution.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو استخدام طرق جديدة لتسمع المواد الخرسانية بطرق غير مدمرة. تعتبر طرق وإجراءات التحقق من جودة الخرسانة المستخدمة بشكل شائع والتي لا تزال قيد التطبيق أيضاً من الأساليب المدمرة، أي أخذ عينات الشهود وتحت اختبار الضغط يتم فحص مستوى مقاومة الخرسانة بشكل أولي ويأخذ المرء القرار بشأن النتيجة فقط لقيمة هذه المقاومة التي يجب ألا تقل عن قيمة أمانة معينة. بصرف النظر عن مستوى مقاومة قطعة الاختبار، يتم إنشاء قاعدة بيانات للإشارات التي تم جمعها أثناء تطبيق قوة الضغط في كل مستوى من مستويات التحميل مع خطوة 1KN لتقليل سرعة التحميل إلى الحد الأدنى (0.01 KN / S).

Sommaire

Introduction	01
Chapitre 1 : les différents types de béton qui existent actuellement et leurs performances.	
1.1. Le béton fibré	03
1.1.1. Utilisations du béton fibré	03
1.2. Le béton auto plaçant	04
1.2.1. Utilisations du béton auto plaçant	04
1.3. Le béton armé	05
1.3.1. Utilisations du béton armé	05
1.4. Béton lourd	06
1.4.1. Utilisations du béton lourd	06
1.5. Béton léger	07
1.5.1. Utilisations du béton léger	07
1.6. Béton projeté	08
1.6.1. Méthodes du béton projeté	08
1.6.2. Utilisation du béton projeté	09
1.7. Béton précontraint	10
1.7.1. Utilisation du béton précontraint	11
1.8. Béton hauts performances	12
1.8.1. Utilisations de la haute performance	12
1.9. Béton prêt à l'emploi	13
1.9.1. Utilisation du béton prêt à l'emploi	13

Chapitre 2 : Les défauts de béton et les méthodes de contrôle du béton non destructifs.

2.1. Les défauts de béton	15
2.1.1. Fissuration du béton	15
2.1.1.1. Les types de fissuration du béton	15
2.1.2.2. Les causes de la fissuration du béton	16
2.1.2. La ségrégation du béton	17
2.1.2.1. Les types de ségrégation du béton	18
2.1.2.2. Les causes de la ségrégation du béton	18
2.1.3. Dégradation du béton	19
2.1.3.1. Les types de dégradation du béton	20
2.1.3.2. Les causes de dégradation du béton	20
2.1.4. Porosité	20
2.1.4.1. Les type de porosité	21
2.1.4.2. Les causes de porosité du béton	21
2.1.5. La corrosion des armatures	22
2.1.5.1. Les types de corrosion des armatures	23
2.1.5.2. Les causes de corrosions des armatures	24
2.2. Contrôle non destructifs	25
2.2.1. Méthodes D'essais	26
2.2.1.1. Essai au scléromètre	26
2.2.1.2. Essai d'auscultation dynamique	28
2.2.1.3. Méthodes combinées	30

Chapitre03 : Méthode d'exploitation des signaux par les ondelettes pour la détection des fissures et leur propagation.

3.1.Fabrication du béton	31
3.1.1.Préparation des éprouvettes	31
3.1.2. Essai d'affaissement	34
3.2. L'écrasement par compression de l'éprouvette	37
de Béton par la méthode des ondelettes	
3.2.1. Essai d'auscultation	40
3.2.1.1. Mode Opérateur	41
3.2.1.2. Manières de mesure	41
3.2.2. Mesure en transparence(directe)	44

Chapitre 04 : Méthodologie d'étude des signaux ultrasons par les ondelettes.

4.1. Introduction	53
4.2. Matériels et méthodes	56
4.3. Méthodologie proposée	61
Conclusion	62
Références	63

Liste des figures

Figure [1.1] : béton fibré	04
Figure [1.2] : béton auto plaçant	05
Figure [1.3] : béton armé	06
Figure [1.4] : béton lourd	07
Figure [1.5] : béton léger	08
Figure [1.6] : béton projeté	10
Figure [1.7] : béton précontrainte	11
Figure [1.8] : béton haute performance	12
Figure [1.9] : béton prêt à l'emploi	14
Figure [2.1] : fissuration du béton	15
Figure [2.2] : ségrégation du béton	18
Figure [2.3] : dégradation du béton	19
Figure [2.4] : porosité	21
Figure [2.5] : corrosion des armatures	22
Figure [2.6] : Scléromètre	27
Figure [2.7] : d'auscultation dynamique	28
Figure [3.1] : composition du béton	32
Figure [3.2] : Sable fin	33
Figure [3.3] : Gravier 3/8	33
Figure [3.4] : Gravier 8/15	33
Figure [3.5] : Gravier 15/25	33

Figure [3.6] : Sable lavé	33
Figure [3.7] : Ciment	33
Figure [3.8] : Essais d'affaissement	34
Figure [3.9] : l'affaissement de notre béton	35
Figure [3.10] : préparation des éprouvettes	36
Figure [3.11] : Courbe de résistance du béton en fonction du temps de séchage	38
Figure [3.12] : courbe de contrainte en fonction du temps de l'éprouvette de référence	38
Figure [3.13] : courbe de contraint en fonction du temps de l'éprouvette de sable 10%	39
Figure [3.14] : courbe de contraint en fonction du temps de l'éprouvette de sable 20%	39
Figure [3.15] : courbe de contraint en fonction du temps de l'éprouvette de sable 30%	40
Figure [3.16] : appareil de mesure	40
Figure [3.17] : Mesures en transparence (directe)	42
Figure [3.18] : mesures en surface (indirecte)	42
Figure [3.19] : mesures semi directe	43
Figure [3.20] (1.2.3.4.5) : les signaux d'éprouvette de référence	44
Figure [3.21] (1.2.3.4.5) : les graphes des signaux d'éprouvette de référence	45
Figure [3.22] (1.2.3.4.5) : les signaux d'éprouvette de 10% de sable	46
Figure [3.23] (1.2.3.4.5) : les graphes des signaux d'éprouvette de 10% de sable	47
Figure [3.24] (1.2.3.4.5) : les signaux d'éprouvette de 20% de sable	48
Figure [3.25] (1.2.3.4.5) : les graphes des signaux d'éprouvette de 20% de sable	49
Figure [3.26] (1.2.3.4.5) : les signaux d'éprouvette de 30% de sable	50
Figure [3.27] (1.2.3.4.5) : les graphes des signaux d'éprouvette de 30% de sable	51
Figure [4.1] : Exemples de fissures dans le béton	54
Figure [4.2] : Centrale nucléaire : réacteur de fusion	55

Figure [4.3] : NDT techniques pour structures en béton	56
Figure [4.4] : Dispositif expérimental : Méthode non-destructive à l'aide de l'ultrason	57
Figure [4.5] : Ultrasonique NDT durant la compression des éprouvettes de béton	58
Figure [4.6] : Quelques spécifications des sensors et leurs utilisations	59
Figure [4.7] : Décomposition d'un signal S sur trois niveaux. A et D représentent respectivement l'approximation et le détail du signal	62
Figure [4.8] : Transformation en ondelettes rapide ou analyse multi résolution	63

Liste des tableaux

Table [3.1] : composition du béton de l'éprouvette de référence	32
Table [3.2] : classe l'affaissement du béton	35
Table [4.1] : Technical specifications of the sensors used in our NDT experiments	59

INTRODUCTION

Introduction

Le béton est un matériau composé du ciment, de sable, de graviers de différents calibres et d'une quantité d'eau adéquate. Les bétons usuels, sont préparés à l'aide de ces matériaux de base. Néanmoins, les besoins spécifiques de la construction civil ou industrielle ainsi que les travaux publics ont évolué dans la conception d'ouvrage et exigence de résistance et durabilité ainsi que respect de l'environnement. Des règlements de plus en plus strictes et exigeants ont emmené les spécialistes en matériaux à rechercher de nouveaux bétons répondants à ces exigences et pousser la conception d'ouvrage vers de nouveaux horizons jamais atteints auparavant. L'utilisation intensive du béton est aussi génératrice de problèmes qui sont liés soit au non-respect des règles de dosages ou de stockage des produits rentrants dans la composition du béton et cela induit en amont des problèmes de fissuration, d'écaillage, de ségrégation etc.

Dans ce modeste travail, on s'est attelé à travers des essais non destructifs à constituer une base de données à même de nous permettre d'ausculter n'importe quelle partie de la bâtisse et ainsi avoir toutes les données sur l'état du béton à l'instant « T ». Pour ce on dispose d'un appareil ultrason dont les caractéristiques sont détaillées dans ce présent travail et d'une presse à compression. Le travail consiste à relever les signaux au fur et à mesure que la force de compression augmente et ce à chaque pas de compression en ayant auparavant réduit la vitesse de compression de la presse au strict minimum. En premier lieu on utilise des éprouvettes témoins qui sont conventionnelles et dont le dosage répond aux exigences réglementaires et les signaux recueillis sont des signaux de références et ce jusqu'à la destruction de l'éprouvette. Dans une deuxième étape, on a simulé des défauts de dosage concernant le sable et ce à hauteur de 10 %, 20% et 30 % et ce jusqu'à rupture de l'éprouvette. Avec les signaux récupérés et avec une analyse multi résolution des signaux.

Les essais non destructifs (CND) [1] sont un ensemble de méthodes couramment utilisées pour caractériser l'état d'intégrité des structures, sans les dégrader, soit lors de la production (par exemple lors de la construction d'ouvrages ou de bâtiments), soit lors de l'utilisation ou du service [2 ,3]. Le développement des méthodes CND a commencé dans les années 60 pour répondre aux demandes de secteurs tels que l'énergie nucléaire, l'aéronautique et le spatial. Le CND a progressivement élargi son champ d'application, passant du strict domaine de la détection, de la reconnaissance et du dimensionnement des défauts localisés à l'évaluation des caractéristiques intrinsèques des matériaux.

INTRODUCTION

La notion de défaut (ou faute) est définie en fonction de l'usage qui sera fait du produit (satisfaction du client final). Dans le cas de la détection précoce des fissures du béton et surtout en cas de dommages internes, le CND est l'outil idéal non seulement pour la détection des fissures mais aussi pour le suivi de leur propagation [4,5]. L'objectif principal de cette étude est de proposer une technique originale de détection de fissures structurelles dans le béton en utilisant un système de contrôle non destructif par ultrasons pour scanner le béton couplé à une méthodologie d'évaluation basée sur l'analyse multi résolution et l'apprentissage profond : -L'analyse multi résolution par ondelettes est un outil qui permet une analyse à plusieurs échelles ou résolutions et imite l'effet d'un microscope [6].

L'apprentissage profond est un type d'intelligence artificielle où la machine est capable d'apprendre par elle-même, par opposition à la programmation où elle exécute simplement des règles prédéterminées. L'apprentissage en profondeur est basé sur des réseaux de neurones avec plusieurs couches de neurones cachés, chacun recevant et interprétant les informations de la couche précédente. L'architecture d'apprentissage en profondeur la plus puissante est appelée réseaux de neurones convolutifs (CNN). Le principe de fonctionnement des CNN est de recevoir des images d'entrée, détecter et apprendre automatiquement les caractéristiques de chacune d'entre elles, puis former un classificateur sur celles-ci. De plus, l'architecture spécifique du réseau permet l'extraction de fonctionnalités de complexité différente, des plus simples aux plus sophistiquées. L'extraction automatique et la hiérarchisation des fonctionnalités, adaptées au problème posé, est l'un des points forts de CNN. En 2012, lors du concours annuel de vision par ordinateur ILSVRC (ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge), une révolution s'est produite : un nouvel algorithme de Deep Learning a battu tous les records ! C'est un CNN appelé AlexNet [7]. Depuis ce jour, CNN est toujours le modèle le plus performant pour la classification d'images. C'est ce qui a motivé son utilisation dans notre expérience.

1. Les différents types de béton

➤ 1.1/ Le béton fibré :

Le béton fibré est un matériau dans lequel sont intégrées des fibres synthétiques ou métalliques de dimensions diverses et réparties de manière homogène dans la masse du béton. Il existe différents types de fibres, ayant des impacts variables sur le béton [8]. Elles ont par exemple pour fonction d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que la résistance en flexion ou la limitation de la fissuration.

Dosées de 0,5 à 2% par m³ de béton, ces fibres possèdent des caractéristiques intrinsèques : composition, dimension, forme.

Il existe différentes catégories de fibres

- Les fibres métalliques
- Les fibres organiques
- Les fibres minérales

1.1.1/ Utilisations du béton fibré

Le béton fibré est utilisé pour réaliser des dallages, de piscine, des fondations des sols, un renforcement des murs et aussi comme enduit [9]

Le béton fibré est surtout utilisé dans des ouvrages importants qui demandent des contraintes élevées.



Figure [1.1] -béton fibré

➤ 1.2/ Le béton auto plaçant :

Le béton auto-plaçant (BAP), caractérisé par son hyper fluidité, se différencie des bétons traditionnels par ses propriétés à l'état frais. En effet [10], le BAP, grâce aux différents constituants qui le composent, a la capacité de se mettre en place par lui-même là où il est appliqué, sans avoir recours à un système de vibration pour l'homogénéiser.

Avantages du BAP :

- Suppression du système de vibration pour sa mise en place
- Diminution du temps de bétonnage
- Permet de couler du béton dans des endroits qui étaient non-propices

1.2.1/ Utilisations du béton auto plaçant :

Le béton auto plaçant est généralement employé sur plusieurs chantiers. Il peut servir à réaliser des ouvrages verticaux, mais aussi horizontaux. Il peut ainsi être employé pour réaliser des dalles, des poteaux, des voiles, des planchers, mais aussi des fondations.



Figure [1.2] -béton auto plaçant

➤ 1.3/ Le béton armé

Le béton armé est un matériau de construction qui associe béton et barres d'acier [11]. Il conjugue ainsi les qualités de compression du béton et la résistance à la traction de l'acier.

Avantages du béton armé

Utilisé seul, le béton peut endurer des efforts de compression mais sa résistance aux efforts de traction est faible. Le fait de placer des barres d'acier, qui jouent le rôle d'armature, permet de pallier cette carence.

1.3.1/ Utilisations du béton armé

Positionnement de l'acier, enrobage et adhérence sont des phases clés pour limiter les déformations éventuelles des ouvrages. Le béton armé est utilisé dans les poutres, les dalles, les voiles, les fondations, les coques et les murs de soutènement.

Le mode de sollicitation de l'ouvrage, la maîtrise de la mécanique des milieux continus et de la résistance des matériaux, la compréhension des phénomènes physiques créant des efforts sur l'ouvrage, relèvent du métier d'ingénieur en béton armé.



Figure [1.3] -béton armé

➤ 1.4/ Béton lourd

Un béton lourd, comme son appellation l'indique, affiche une masse volumique plus importante que le béton classique [12].

C'est un produit composé de granulats très dense et possédant une viscosité plus élevée. On y fait appel dans des situations bien précises, pour des coulées de pont, pour des lests ou contreponds ou encore pour assurer la protection contre les radiations.

1.4.1/ Utilisations du béton lourd

Le béton lourd est principalement utilisé pour réaliser des contreponds, que ce soit pour des lests ou pour des systèmes basculants.



Figure [1.4] -béton lourd

➤ **1.5/ Béton léger**

Le béton léger ou béton allégé est un béton de ciment avec une masse volumique à sec inférieure à celle d'un béton normal [13]. Ce béton peut contenir un pourcentage volumique important de granulats légers ou peut être rendu cellulaire par aération ou moussage.

1.5.1/ Utilisations du béton léger

Le béton léger est utilisé pour des travaux bien précis tels que :

Certaines fondations dont la structure demande une charge moins élevée. Les rénovations ou remise à niveau de planchers avant la chape ce qui permet de ne pas renforcer au préalable la structure.



Figure [1.5] -béton léger

➤ 1.6/ Béton projeté

La technique du béton projeté fait appel à une machine capable de projeter via un tuyau et une buse du béton semi-liquide non pas dans un contenant [14], mais sur un support libre. En général, on enduit un ferrailage de la même manière qu'une machine à crépir.

Cette technique autorise donc toutes les formes complexes, notamment les arrondis de piscines, murets, bassins, et dans toutes les positions possibles jusqu'aux voûtes et plafonds.

C'est le grand avantage du béton projeté de pouvoir être appliqué partout où il est impossible de monter des structures comme des banches et des coffrages ou d'acheminer des matériaux comme des poutrelles ou des hourdis.

1.6.1/ Méthodes du béton projeté : voie sèche et voie humide

La confection du béton projeté et son mode de diffusion peuvent se faire de deux manières :

- **La voie humide** : c'est la plus utilisée notamment en BTP dans les tunnels, les piscines et les surfaces complexes. Elle consiste à mélanger d'abord l'intégralité des ingrédients et adjuvants éventuels dans une toupie ou une centrale à béton puis de propulser le béton prêt à l'emploi grâce à la machine à projeter le béton par voie humide.
- **La voie sèche ou gunitage** : moins couramment utilisée en intérieur, c'est la technique préférée pour les chantiers difficiles en extérieur (parois, soutènements, berlinoises,

sécurisation de couloirs à éboulis, etc.). Elle consiste à mélanger les éléments secs du béton et à propulser la poudre ainsi constituée via la machine à projeter par voie sèche. Ce n'est qu'en sortie de la lance de projection que l'eau est ajoutée au mélange afin de constituer le béton humide qui se déposera sur la surface à enduire.

1.6.2/ Utilisation du béton projeté

Les qualités des bétons projetés prédisposent l'emploi de l'une ou l'autre technique à :

La projection par voie sèche :

- Travaux de réparation et de renforcement (forte résistance, grande adhérence et retrait réduit).
- Rejointoiement des murs en maçonnerie à joint large (faible débit et grande adhérence) ;
- Projection sur falaise et talus (forte résistance et grande adhérence) ;
- Béton réfractaire (forte résistance et grande adhérence).
-

La projection par voie mouillée

- Soutènements en souterrain (fort débit, peu de poussière, résistance exigée moindre) ;
- Protection des berges (fort débit, aucune adhérence nécessaire).
- Projection verticale vers le bas (pas de piégeage des pertes).
- Projection sur support fragile (faible force d'impact) .
- Rejointoiement de maçonnerie à joints étroits



Figure [1.6] -béton projeté

➤ 1.7/ Béton précontraint

Le béton précontraint est un matériau de construction composite dans lequel ont été préalablement introduites des tensions opposées à celles qu'il devra subir une fois mis en œuvre.

Cette technique vise à améliorer la résistance du béton face à diverses sollicitations [15], lorsqu'il sera notamment soumis à des charges et des tractions dangereuses pour son intégrité, comme la charge d'exploitation ou la charge climatique. Regardons cette technique en détails. On distingue 2 formes de précontrainte :

- **Par pré-tension** : il s'agit d'une tension effectuée sur les armatures avant la prise complète du béton. Les armatures sont ensuite relâchées. Le béton se met alors en compression par effet d'adhérence. Cette technique est généralement appliquée en usine, avec des machines spéciales, et également mise en œuvre pour la préfabrication de prédalles et de poutrelles. Toutefois, elle permet d'obtenir des valeurs de précontrainte inférieures à la technique par post-tension.
- **Par post-tension** : il s'agit d'une tension effectuée sur les armatures après la prise complète du béton. Les câbles sont tendus de manière à comprimer l'ouvrage au repos.

CHAPITRE 01

Il s'agit là d'une technique plus complexe qu'en pré-tension. Elle est de ce fait destinée à de très grands ouvrages, car elle nécessite en outre l'utilisation de grandes pièces d'embout disposées de part et d'autre de l'ouvrage.

1.7.1/ Utilisation du béton précontraint

Les ponts.

Les structures off-shore.

Les réservoirs et les silos.

Les enceintes de réacteurs nucléaires

Les bâtiments industriels, commerciaux ou agricoles.



Figure [1.7] -béton précontrainte

➤ 1.8/ Béton hauts performances

Béton ayant une résistance mécanique élevée, ce qui lui accorde une très grande résistance (compression, gel-dégel, fissuration...).

C'est la réduction de la porosité du béton qui permet l'obtention (via sa compacité) de hautes performances.

Le béton haute résistance offre une résistance à la compression remarquable dès son plus jeune âge (une résistance à la compression de 55 à 100 MPA à 28 jours au lieu d'une résistance de 20 à 50 MPA pour un béton ordinaire) [16]. Le béton haute performance bénéficie également d'une meilleure ouvrabilité due à la présence de super plastifiants et d'une très faible perméabilité en raison de sa faible porosité. De plus, le BHP a une très bonne résistance aux agents agressifs du fait de sa faible perméabilité. Enfin, son excellente résistance mécanique lui permet de faire face aux cycles gel/dégel et de résister à la déformation lorsque le béton est soumis à des charges importantes sur le long terme.

1.8.1/ Utilisations de la haute performance

Le béton haute performance est utilisé pour les ouvrages nécessitant une résistance élevée : les travaux souterrains et les tunnels, les parkings, les ouvrages d'art, les travaux en milieu marin, les éléments préfabriqués, les ouvrages exceptionnels tels que les centrales nucléaires ou les ponts.



Figure [1.8] -béton haute performance

➤ 1.9/ Béton prêt à l'emploi

Le béton prêt à l'emploi (BPE) est un béton qui, une fois livré sur le chantier, peut être directement utilisé sans aucun autre travail.

En d'autres termes, il s'agit d'un matériau fabriqué dans une centrale à béton pour permettre d'accélérer la réalisation de ses travaux [17].

Comme c'est le cas pour d'autres types, le béton prêt à l'emploi est un mélange de ciment, de sables, de gravillons, d'eau et d'adjuvants en proportion équivalente pour assurer la solidité de la construction.

Grâce à sa composition homogène, ce type de béton a la particularité de répondre à la fois à l'audace des architectes et aux exigences de la construction. Il constitue donc un choix parfait pour réaliser rapidement des travaux de qualité irréprochable.

Produit frais et 100 % local, le BPE est également caractérisé par un temps de prise réduit par rapport aux autres.

En général, il doit être utilisé dans deux heures qui suivent sa fabrication. Vous devez donc tenir compte de la proximité pour choisir votre centrale à béton (moins de 20 km)

1.9.1/ Utilisation du béton prêt à l'emploi

- L'aménagement du territoire.
- Les constructions de logements durables, dont les hôpitaux, les logements sociaux, les bureaux.
- Les routes.
- Les allées ou les terrasses.
- Les dalles.
- Les planchers.



Figure [1.9] -béton prêt à l'emploi

2/Conclusion

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 besoin

Les défauts de béton

➤ 2.1/ Fissuration du béton :

La fissuration du béton est la rupture des éléments qui le constituent. Elle se caractérise par l'observation de quelques ouvertures du mur bétonné ou le craquelage de ce dernier. La fissuration peut porter préjudice quant à la durée du béton [18]. En effet, celui-ci est exposé aux Attaques d'agents agressifs, le rendant de ce fait fragile.

Le plus souvent, la fissuration du béton est un phénomène normal et prévu par l'ingénieur en charge de sa construction.

Cependant, il existe également des fissurations imprévues qui constituent la plupart du temps un problème auquel il faut trouver les bonnes solutions.



Figure [2.1] - fissuration du béton

2.1.1/ Les types de fissuration du béton

La fissuration imprévue du béton varie suivant plusieurs types. On a ainsi des fissures qui peuvent être liées au ressuage, des fissures de traction et des fissures de retrait.

Les fissures de retrait sont entre autres : des retraites de plastique, des retraites de durcissement et des retraites thermiques.

- **La fissuration du béton par ressuage** : elle s'observe le plus souvent lors du séchage du béton et consiste en la formation d'eau à sa surface par entassement. Les fissures peuvent être ainsi liées au ressuage au cas où l'entassement du béton serait empêché par des cailloux ou tout autre élément.
- **Les fissures du béton liées au retrait de plastique** : le retrait de plastique se veut lors de l'évaporation de l'eau de la partie apparente du béton. Lors du durcissement de celui-ci, le retrait des plastiques est empêché par les différents éléments, entraînant ainsi sa fissure.
- **Les fissures du béton liées au retrait thermique** : elles sont causées par la réaction qui a lieu par le contact entre le ciment et l'eau. C'est une réaction exothermique, et de ce fait, elle s'accompagne de chaleur. Celle-ci peut conduire à la contraction du béton et engendrer des fissurations.
- **Les fissures de traction** : elles apparaissent le plus souvent lorsque les éléments du béton sont issus de coffrage glissant. En effet, en cas d'incompatibilité entre le coffrage glissant et le mélange de béton suivant les contraintes de traction, le béton rencontre des fissures. Il est donc important à cet effet de disposer d'une quantité suffisante de ciment dans le béton. Évitez toutefois de faire en excès. Les fissures de traction sont à prendre au sérieux, car elles sont pour la plupart assez ouvertes.

2.1.2/ Les causes de la fissuration du béton

De nombreuses réactions physico-chimiques sont la cause de fissuration dans le béton, en voici la liste :

- **Le ressuage** : lors de son séchage, le béton se tasse et une pellicule d'eau vient se former à sa surface. Les gros granulats ou les armatures peuvent faire office d'obstacle à ce tassement et ainsi fissurer le béton avant sa prise complète. Ce phénomène est très léger et ne causera pas de désordres dans vos constructions.
- **Le retrait** : il en existe de différents types et à divers stades de la vie du béton, mais tous mènent au même résultat, une réduction du volume du béton par réaction chimique. Ce phénomène, s'il est empêché par frottement, mènera inévitablement à des fissures. Pour limiter le retrait endogène un brumissement régulier du béton durant le séchage est envisageable. Un béton composé avec beaucoup de ciment aura plus tendance à se retirer, faites donc attention à vos formulations.

- **Les conditions de mise en œuvre** : un béton contenant une quantité d'eau trop importante perdra énormément en résistance et donc sera sujet à une fissuration plus importante.
- **Les conditions climatiques** : sont toutes aussi importantes, une température trop élevée entrainera un séchage trop rapide du béton et une forte dessiccation donc des fissures. Si la température est trop basse, le béton risque alors de geler et de devenir beaucoup plus cassant, d'où l'apparition de fissures dans les bétons soumis à des cycles gel/dégel.

Si vous habitez en zone où les sels de déverglaçage sont courants et où il gèle beaucoup, pensez à utiliser des adjuvants entraîneur d'air qui empêcheront une fissuration due au gel/dégel. Et surtout, surtout ne rajoutez pas d'eau à vos formulations où vous serez sûrs que les fissures apparaîtront sous peu !

- **La vibration** : si votre béton est trop vibré, le phénomène de ressuage se trouve accentué et ainsi la fissuration plus importante. S'il l'est trop peu alors de nombreuses bulles d'air sont présentes facilitant ainsi la fissuration interne ou externe.

➤ 2.2/ La ségrégation du béton

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (déchargement, pompage, mise en place [19], compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos.

La ségrégation a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur sa résistance et sa durabilité. Elle peut résulter d'une séparation entre :

- Les différentes fractions granulaires
- Les granulats et la pâte de ciment
- Les fines et l'eau de gâchage.



Figure [2.2] - ségrégation du béton

2.2.1/ Les types de ségrégation du béton

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner :

- Les "nids de gravier" : concentrations locales de gros granulats.
- Les "remontées d'eau", appelées aussi "veines de sable" : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales lors du compactage.
- Le "ressuage" : accumulation d'un excédent d'eau sur les surfaces horizontales du béton, il en résulte des surfaces irrégulières, farineuses ou poreuses.
- Les "micro-ségrégations" (ciment/fines) sont souvent plus gênantes pour l'œil que pour la qualité.

2.2.2/ Les causes de la ségrégation du béton :

Les causes principales des divers types de ségrégation sont les suivantes :

- Consistance trop fluide du béton frais
- Dosage excessif du plastifiant ou du super plastifiant
- Mise en place incorrecte du béton (vibration exagérée, absence de tube pour des hauteurs de chute élevées, déversement du béton contre un coffrage vertical)

CHAPITRE 02

- Formulation inadéquate du béton (mauvaise recombinaison des fractions granulaires, dosage en fines insuffisant, dosage en eau excessif)
- Dimension des granulats trop importante par rapport aux dimensions de l'élément à bétonner et à l'épaisseur d'enrobage des armatures.
- Temps de malaxage trop court
- Mauvaise étanchéité des joints de coffrage, pertes de laitance (effet de filtre)
- Armature trop dense (effet de tamis).

➤ 2.3/ Dégradation du béton

Le béton enrobe une armature d'acier qui lui confère l'essentiel de sa résistance mécanique. La corrosion de cette armature n'est possible qu'après dégradation de l'enrobage [20]. ... les eaux d'infiltration. Les phases de dégradation du béton sont d'abord d'origine mécanique, puis d'ordre chimique.



Figure [2.3] - dégradation du béton

2.3.1/ Les types de dégradation du béton

Les dégradations mécaniques : Les bétons peuvent subir des agressions de type mécaniques. Celles-ci peuvent à tout moment survenir à la suite de L'abrasion, de choc, de déplacement y compris les tassements de sol, d'explosion, de fatigue en surcharges ou de vibrations.

Les dégradations par agression chimique : Les bétons peuvent être confrontés à des environnements chimiquement agressifs du fait de l'activité biologique (algues, bactéries, etc.), d'agents corrosifs, de la réaction alcali-granulats ou cancer du béton

Les bétons peuvent aussi manifester d'autres pathologies chimiques telles que la carbonatation, la réaction sulfatique, la formation de gel ou de cristallisation d'étringite secondaire, etc.

Les dégradations physiques : Par dégradations physiques, on entend l'ensemble des causes qui peuvent provoquer l'éclatement du béton comme, par exemple la cristallisation saline, l'érosion, l'exposition répétée à des cycles gel-dégel, le retrait, l'usure, les phénomènes thermiques, y compris les incendies.

2.3.2/ Les causes de dégradation du béton

- Les altérations chimiques dont la corrosion des aciers, la dissolution de la matrice cimentaire, l'alcali-réaction, la réaction sulfatique interne, la biodétérioration .
Les altérations mécaniques dues aux surcharges, aux cycles de fatigue .
- Les altérations physiques causées par les chocs, l'abrasion, les cycles gel/dégel...

➤ 2.4/ Porosité

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique comprise entre 0 et 1 (ou, en pourcentage, entre 0 et 100 %), qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat (voir aussi Loi de Darcy).



Figure [2.4] – porosité

2.4.1/ Les type de porosité

La porosité peut avoir diverses origines, propre au matériau et à son évolution dans le temps, ce qui conduit à des pores de taille et de géométrie différentes, plus ou moins interconnectés.

- Selon la forme et l'origine des pores
- Selon la taille des pores
- Porosité et exploitation de ressource souterraines
- Selon la nature des pores
- Les roches poreuses

2.4.2/ Les causes de porosité du béton

- La porosité dépend de plusieurs facteurs :
- Le rapport E/C (Eau sur Ciment),
- La compacité du béton frais,
- Le volume pâte/granulats

➤ 2.5/ La corrosion des armatures :

La corrosion des armatures [21] se produit en présence : d'eau et d'oxygène, elle est favorisée par le CO_2 et les chlorure.

La qualité d'exécution du béton est un facteur essentiel dans l'apparition des désordres :

- Présence de fissures ;
- Ségrégation du béton ;
- Porosité importante.



Figure [2.5] - corrosion des armatures

2.5.1/ Les types de corrosion des armatures

- **La corrosion des armatures : Enrobage des aciers**

L'enrobage des armatures est l'élément déterminant pour la durabilité du béton.

À titre d'exemple, les règlements de construction (CCBA 68, BAEL, puis Eurocode 2) fixent cet enrobage entre 4 et 5 cm pour les bétons exposés à une ambiance marine.

La pénétration de l'oxygène, de l'humidité ou des agents agressifs peut être favorisée par :

Une composition incorrecte du béton (dosage insuffisant, mauvais rapport E/C) qui abaisse les caractéristiques mécaniques, favorise l'apparition de fissures et augmente la porosité,

Une mauvaise mise en œuvre (ségrégations du béton) ou une cure insuffisante (Formation de fissures).

- **La corrosion des armatures : Armatures de précontrainte**

Pour les aciers de précontrainte (fils ou torons) la combinaison des attaques corrosives et des contraintes de tension appliquées dans ces armatures entraîne une rupture par corrosion soustension.

Il s'agit d'une corrosion à caractère fissurant se développant à partir de piqûres superficielles des armatures et qui peut entraîner la rupture sans perte de matière significative.

- **La corrosion des armatures : Corrosion en cellule occluse**

Dans un cas très particulier (milieu confiné, absence d'oxygène, teneur élevée en chlorures), la corrosion s'opère en cellule occluse et ne se traduit pas par la formation d'oxydes expansifs. Il se forme un constituant spécifique : la rouille verte, stable en l'absence d'oxygène.

Il se produit une acidification importante du milieu et l'acier se dissout totalement sans aucun signe extérieur visible.

- **Les corrosions des armatures : carbonations**

On parle de Carbonatation du béton. Ce phénomène entraîne une diminution du pH de la solution interstitielle qui passivait les armatures ; lorsque la zone carbonatée atteint le niveau des aciers, la corrosion peut alors s'amorcer.

2.5.2/ Les causes de corrosions des armatures

L'acier d'armature est durablement protégé de la corrosion dans un béton alcalin, non carbonaté et non chargé en chlorures.

Cette protection est garantie par la haute alcalinité de la solution interstitielle des pores de la pâte de ciment, dont les valeurs de pH se situent entre 12,5 et 13,5 selon le type et la quantité de ciment, ainsi que par d'éventuelles additions (p.ex. cendres volantes, fumée de silice).

La couche passive protectrice à la surface de l'acier peut être détruite par deux mécanismes : la carbonatation et l'attaque par les chlorures. La vitesse de dépassivation (phase 1) dépend essentiellement de l'épaisseur, de la qualité du béton d'enrobage, ainsi que des conditions environnementales. p.ex. cendres volante, fumée de silice

Méthode de contrôle du béton non destructifs

3.1/ Contrôle non destructifs

Un CND, contrôle non destructif, est un ensemble de méthodes permettant de contrôler certaines propriétés/caractéristiques du béton sans compromettre son intégralité [22]. Ces contrôles peuvent être effectués lors de la production du béton, sa mise en œuvre et sur le béton durci. De plus, ces essais peuvent être d'ordre acoustique, électromagnétique, électrochimique et thermique.

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps

Avantages de ces méthodes réside dans

Les méthodes non destructives présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée.
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps.
- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction.
- Une progression plus rapide et plus économique.

Principaux domaines d'application

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance
- L'homogénéité
- La porosité
- La durabilité

3.2/ Méthodes D'essais

Il existe deux 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 des quelles, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests suivants :

- ✓ Essai au scléromètre :
- ✓ Essai d'auscultation dynamique
- ✓ Méthodes combinées
- ✓ Méthode par carottage, etc.

➤ 3.2.1/ 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 [23]. 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 d'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 déclaré que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre soulève des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.



Figure [2.6] –Scléromètre

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.

➤ 3.2.2/ 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 [24]. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée



Figure [2.7] - d'auscultation dynamique

CHAPITRE 02

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés.

Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

1-Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

2-La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3-Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. FELDMAN (1977).

4-La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse BUNGEY (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

➤ 3.2.3/ Méthodes combinées

Il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. A titre d'exemple MAMILLAN ET BOUINEAU (1980) on déduit de leur recherche sur ce sujet une méthode combinée qui permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai non destructif utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en 28 jours sont habituellement nécessaires pour évaluer l'exactitude de la méthode non destructive. En outre, la corrélation avec des résistances à la compression en place employant des carottes de un ou deux endroits peut fournir des conseils en interprétant des résultats d'essai non destructifs; ceux-ci peuvent alors être employés pour examiner de plus grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement est la méthode combinée ; elle permet d'attendre une précision accrue. Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique.

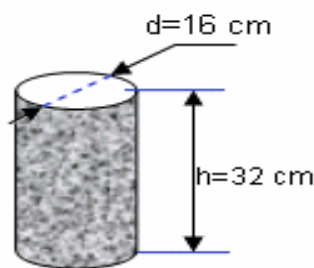
La méthode a été développée pour essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

4.1/Fabrication du béton

Le béton est confectionné en incorporant dans l'ordre le gravier puis le sable et en fin le ciment, les constituants sont ensuite mélangés brassés à sec durant approximativement une minute. L'eau est ensuite ajoutée doucement afin de vérifier visuellement l'ouvrabilité du béton [25]. L'ensemble est ensuite mélangé durant approximativement 2 minutes. L'essai d'ouvrabilité est mené afin de vérifier et d'ajuster le dosage en eau.

4.1.1/Préparation des éprouvettes :

Dans notre cas nous avons fait 4 éprouvettes de type cylindrique (16x32) cm².



1)La première éprouvette (épreuve de référence)

Sable lavé :	.....	35 kg/m ³
Sable fin :	.....	6 kg/ m ³
Gravier 3/8 :	.....	6 kg/ m ³
Gravier 8/15 :	.....	22kg/ m ³
Gravier 15/25 :	.....	20kg/ m ³
Ciment :	.....	17.5 kg/ m ³
Eau :	.....	9kg/ m ³

2)La deuxième éprouvette

Avec un excès en dosage de 10 % de sable (en sable)

3)La troisième éprouvette

Avec un excès en dosage de 20 % de sable (en sable)

4)La quatrième éprouvette

En ajoute +30 % de sable (même chose ici)

CHAPITRE 03

Le dosage réglementaire adopté est spécifié dans le document ci-après qui est la propriété du laboratoire des travaux publics de Bouira.

Ce dernier est certifié ISO et procède à des essais sur échantillons en provenance de pays de l'UE tel la Slovaquie et la Roumanie.

COMPOSITION	PESEES POUR 1 M3 DU BETON Dosage en kg/m3	PESEES POUR UNE GACHEE D'ESSAI AU LABORATOIRE Dosage en kg/m3	PESEES EN (L) CALCULEES POUR UN SAC DE CIMENT DE 50kg Dosage en LITRE
Sable lavé sabig	705	36	65 L
Sable fin Bouss	130	6	12
Gravier 3/8 sabig	110	6	11
Gravier 8/15 sabig	440	22	43 L
Gravier 15/25 sabig	405	20	39
Ciment	350	17,5	50 un sac de ciment
Eau	185	9	26 L
Poids du 1M3 du béton	2314,0	116,23	246,8

Tableau [3.1] - composition du béton de l'éprouvette de référence

Agrégats : Les différents agrégats utilisés lors de la mise en forme des éprouvettes proviennent exclusivement de la centrale à agrégats pour la construction logements AADL de la ville de Bouira ; celle-ci est située à la sortie ouest de Bouira dans quartier Belmahdi. Ces agrégats de différents calibres et sable sont illustrés par les photos ci-après.



Figure [3.1] - composition du béton



Figure [3.2] - Sable fin (6 kg/ m^3)



Figure [3.3] - Gravier 3/8 (6 kg/ m^3)



Figure [3.4] - Gravier 8/15 (22 kg/ m^3)



Figure [3.5] - Gravier 15/25 (220 kg/ m^3)



Figure [3.6] - Sable lavé (35 kg/ m^3)



Figure [3.7] - Ciment (17.5 kg/ m^3)

4.1.2/Essai d'affaissement

En appliquant les indications de la norme NF EN 12350- 2 - Réaliser l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, mesurer la valeur de l'affaissement A en cm.

Mode opératoire

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- La plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;
- Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm². Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams (**en**)³ ;
- Une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- Le cône est arasé avec une tige ;
- Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler ;
- L'affaissement du béton frais est mesuré.

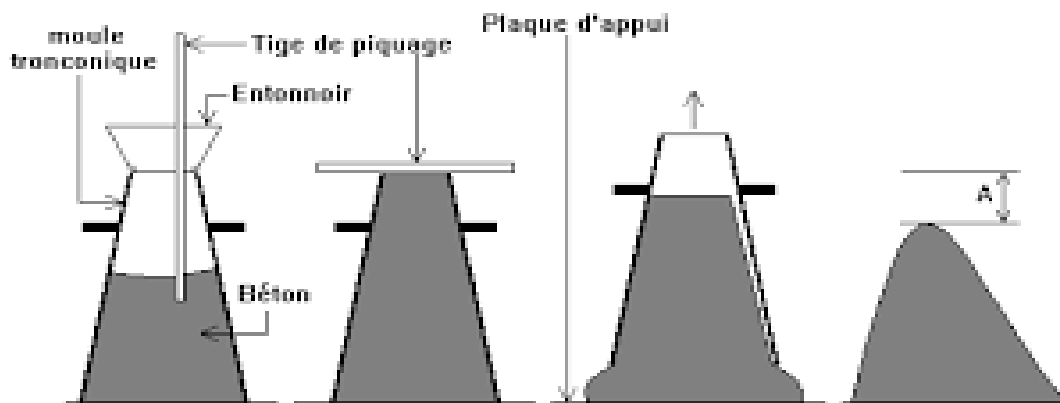


Figure [3.8] - Essais d'affaissement

La norme NF EN 206⁵ classe l'affaissement du béton en cinq groupes voir le tableau suivant :

Tableau [3.2] - classe l'affaissement du béton

Classe	Affaissement en mm	Propriété du béton frais	Utilisations
S1	10 – 40	Ferme, très secs et peu maniable	Fabrication de routes, fondations à armature légère
S2	50 – 90	Plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne	Béton armé normal placé avec vibration
S3	100 – 150	Très plastique, très humide et à maniabilité élevée	
S4	160 – 210	Fluide, très humide et à maniabilité élevée	
S5	≥ 220	Très fluide, très humide et à maniabilité élevée	



Figure [3.9] - l'affaissement de notre béton.

CHAPITRE 03

L'échantillon a été rempli selon le nombre de couches nécessaires pour faire vibrer le béton et vibrer selon le temps spécifié.

La dernière couche est remplie jusqu'au bord de l'éprouvette. Elle est ensuite vibrée conformément au temps indiqué. la vibration contracte le béton .le volume de béton dans l'éprouvette diminue. Cette diminution de volume est compensée en remplissant l'éprouvette au fur et à mesure afin que le niveau de béton soit maintenu jusqu'au bord supérieur de l'éprouvette.

L'éprouvette est arasée par une règle.



Figure [3.10] (1.2.3.4) - préparation des éprouvettes

4.2/L'écrasement par compression de l'éprouvette de béton par la méthode des ondelettes

La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est assez lente : au bout de 7 jours, la résistance mécanique atteint à peine 75 % de la résistance finale.

La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé, par la température du matériau lors de son durcissement, par la quantité d'eau utilisée, par la finesse de la mouture du ciment ou par la présence de déchets organiques [26]. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours, équivalent à 80 % de la résistance finale.

La résistance à la compression est l'une des propriétés techniques les plus importantes des maçonneries et du béton de ciment. Elle se mesure par des essais de compression sur des cubes ou des cylindres dans le cas du béton, et pour les maçonneries des prismes, des portions de mur ou des pans entiers de murs.

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement), par opposition à la résistance à la traction qui est une résistance à l'allongement (éclatement) et à la résistance au cisaillement qui est principalement une résistance à la torsion (vrille).

C'est une valeur clé pour la conception de structures. Elle se mesure sur des matériaux ainsi que sur des composants ou des structures.

Par définition, la résistance à la compression d'un matériau est l'effort de compression uniaxial atteint à la rupture complète du matériau. Si le matériau est ductile cette rupture n'aura pas lieu mais le matériau se déformera de manière irréversible, de sorte que la résistance à la compression est assimilée à l'effort atteint à la limite de la déformation

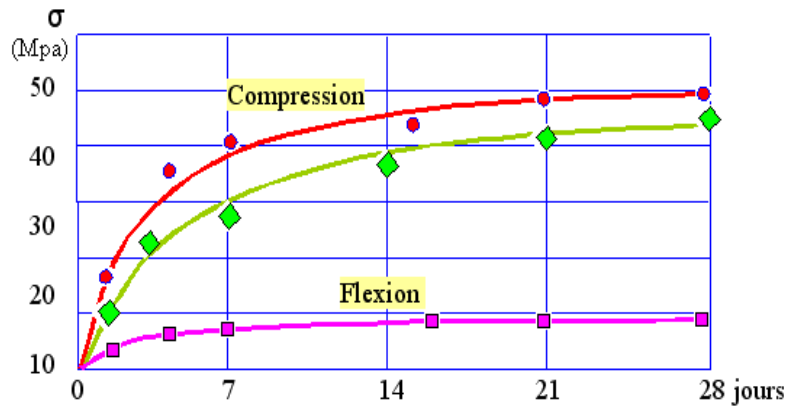


Figure [3.11] - Courbe de résistance du béton en fonction du temps de séchage.

1) L'éprouvette de référence

Poids : 15230 g

Contrainte maximale : 35.5723 MPA

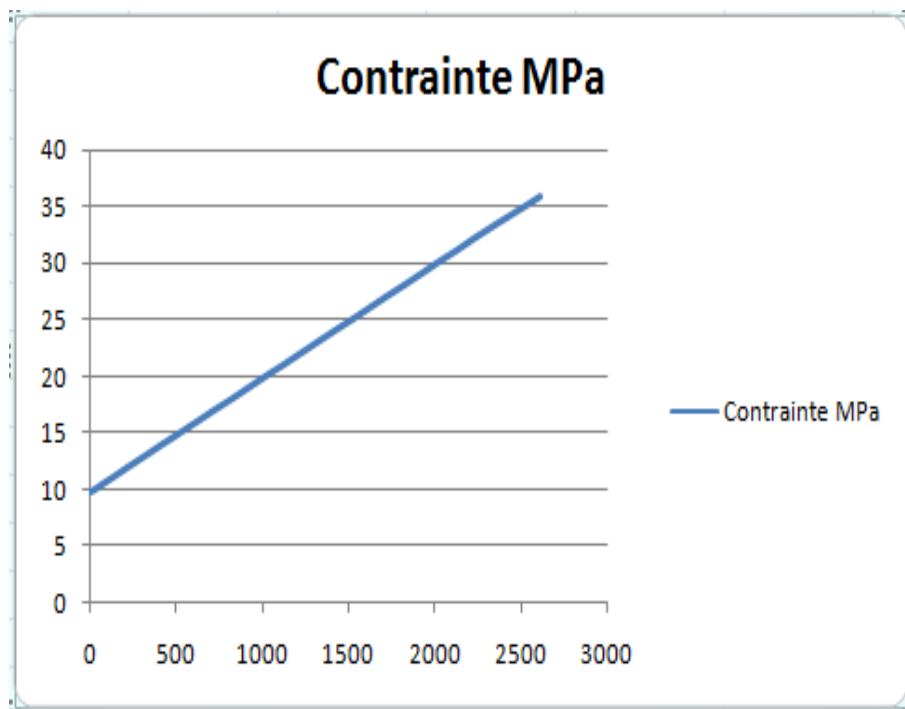


Figure [3.12] - courbe de contrainte en fonction du temps de l'éprouvette de référence

2) L'éprouvette de 10 % de sable en plus :

Poids : 15050 g

Contrainte maximale : 29.1167 MPA

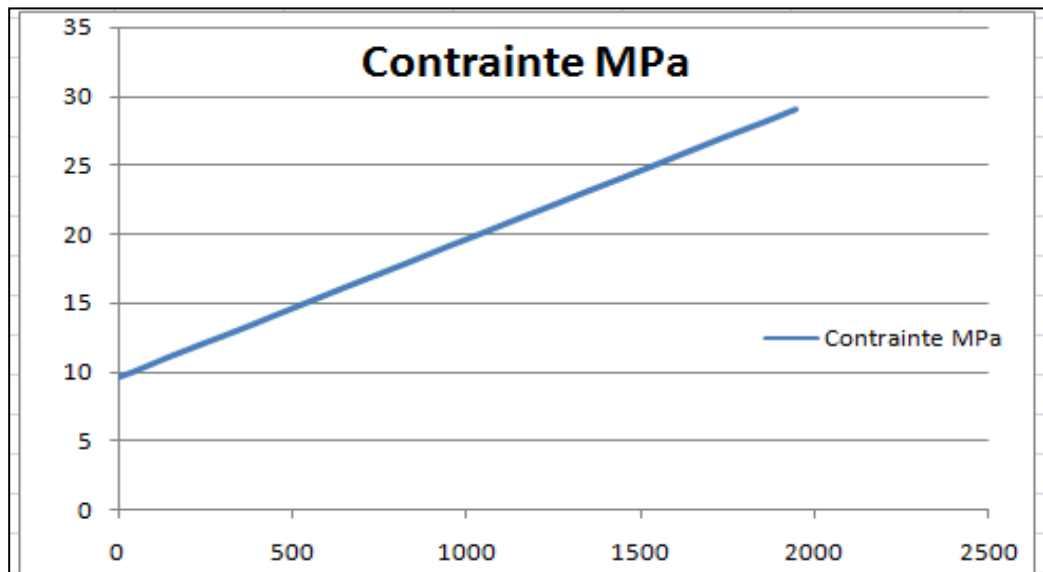


Figure [3.13] - courbe de contraint en fonction du temps de l'éprouvette de sable 10%.

3) L'éprouvette de 20 % de sable en plus :

Poids : 15090 g

Contrainte maximale : 32.1361 MPA

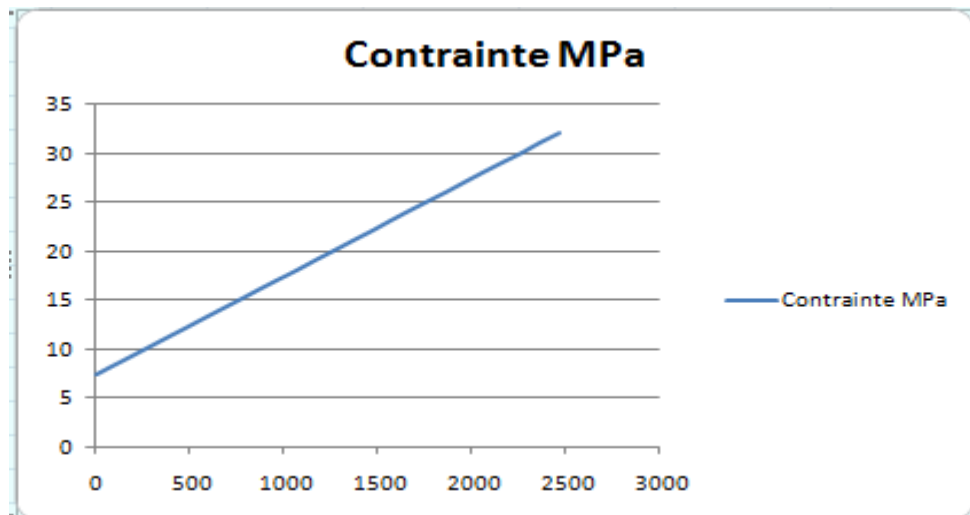


Figure [3.14] - courbe de contraint en fonction du temps de l'éprouvette de sable 20%

4) L'éprouvette de 30 % de sable en plus :

Poids : 15050 g

Contrainte maximale : 32.0801 MPa

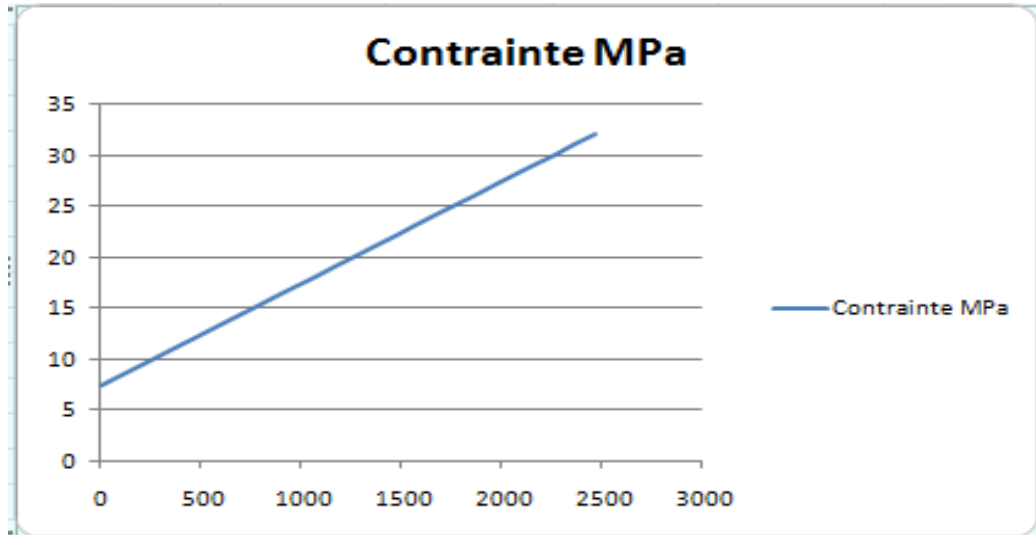


Figure [3.15] courbe de contrainte en fonction du temps de l'éprouvette de sable 30%

4.2.1/Essai d'auscultation

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

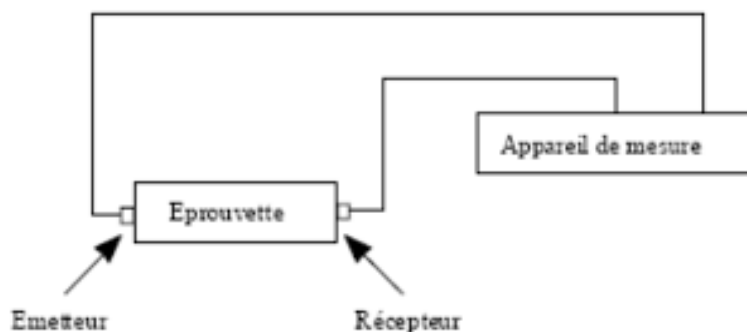


Figure [3.16] - appareil de mesure

4.2.1.1/Mode Opérateur

➤ 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.

➤ 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.

➤ Distances minimales entre points de mesures

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

➤ 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.

4.2.1.2/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 :

➤ 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.

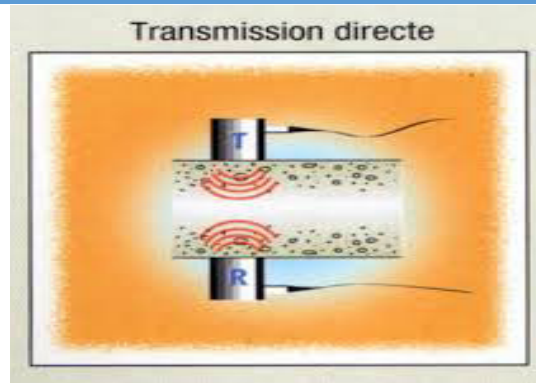


Figure [3.17] -Mesures en transparence (directe)

➤ **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

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.

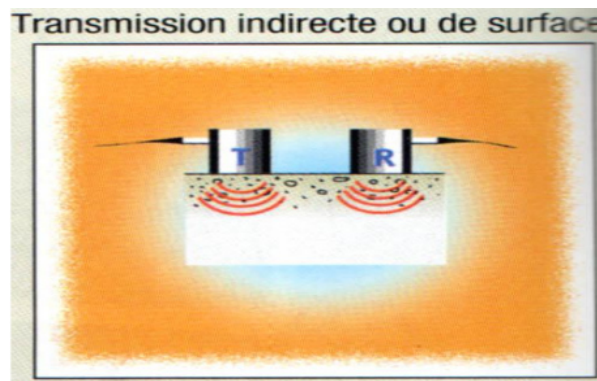


Figure [3.18] -mesures en surface (indirecte)

➤ **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

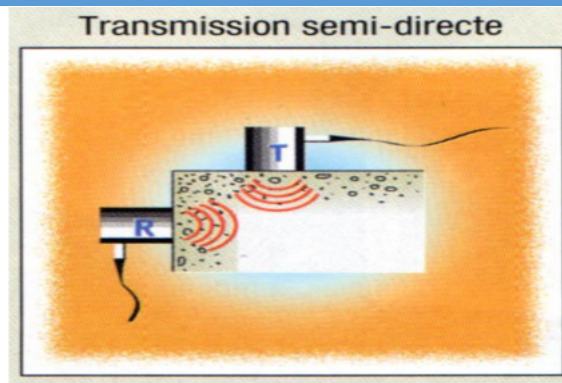


Figure [3.19] -mesures semi directe.

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 (1976) 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.

4.2.2/Mesure en transparence(directe)

1) l'éprouvette de référence

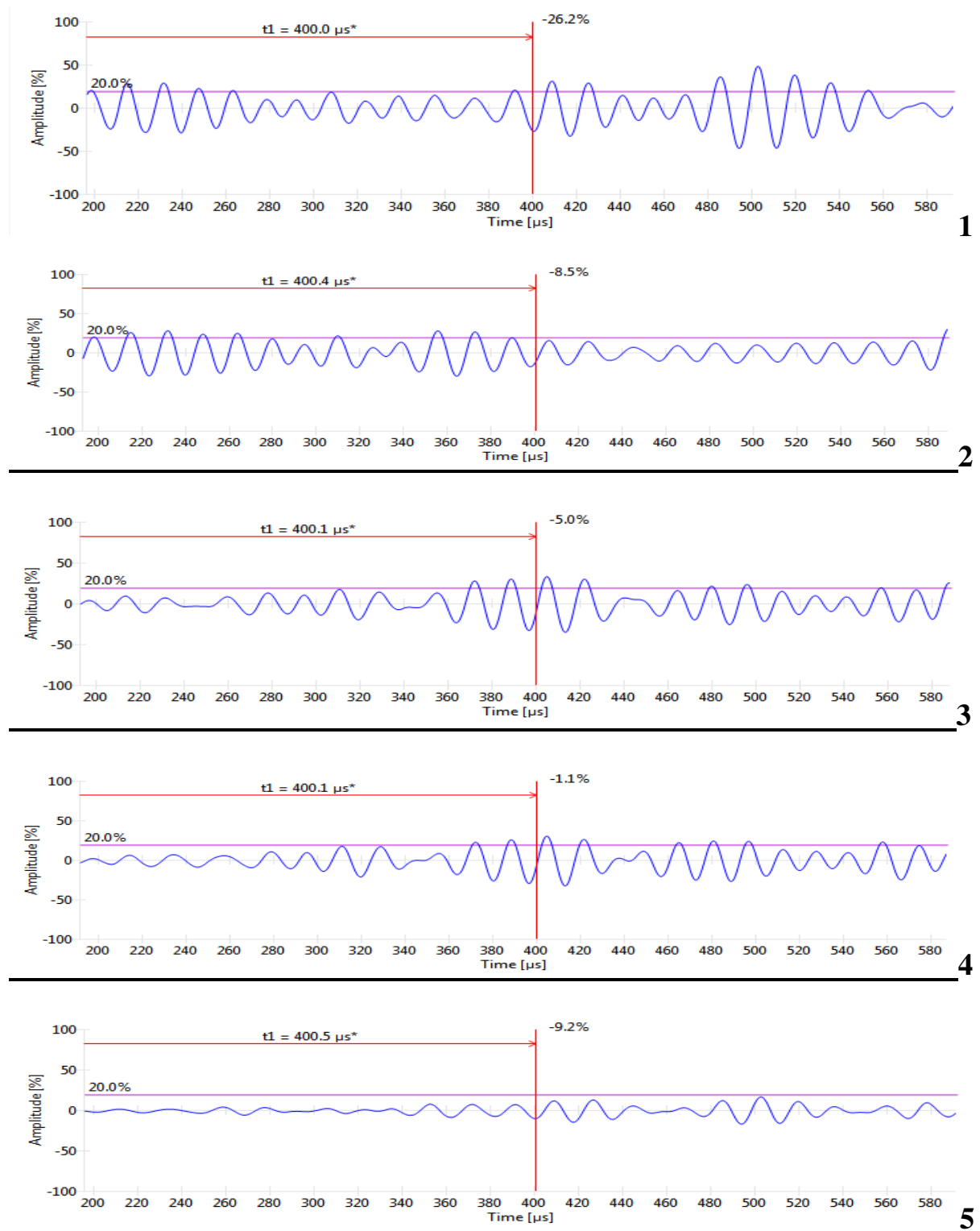


Figure [3.20] (1.2.3.4.5) -les signaux d'éprouvette de référence

CHAPITRE 03

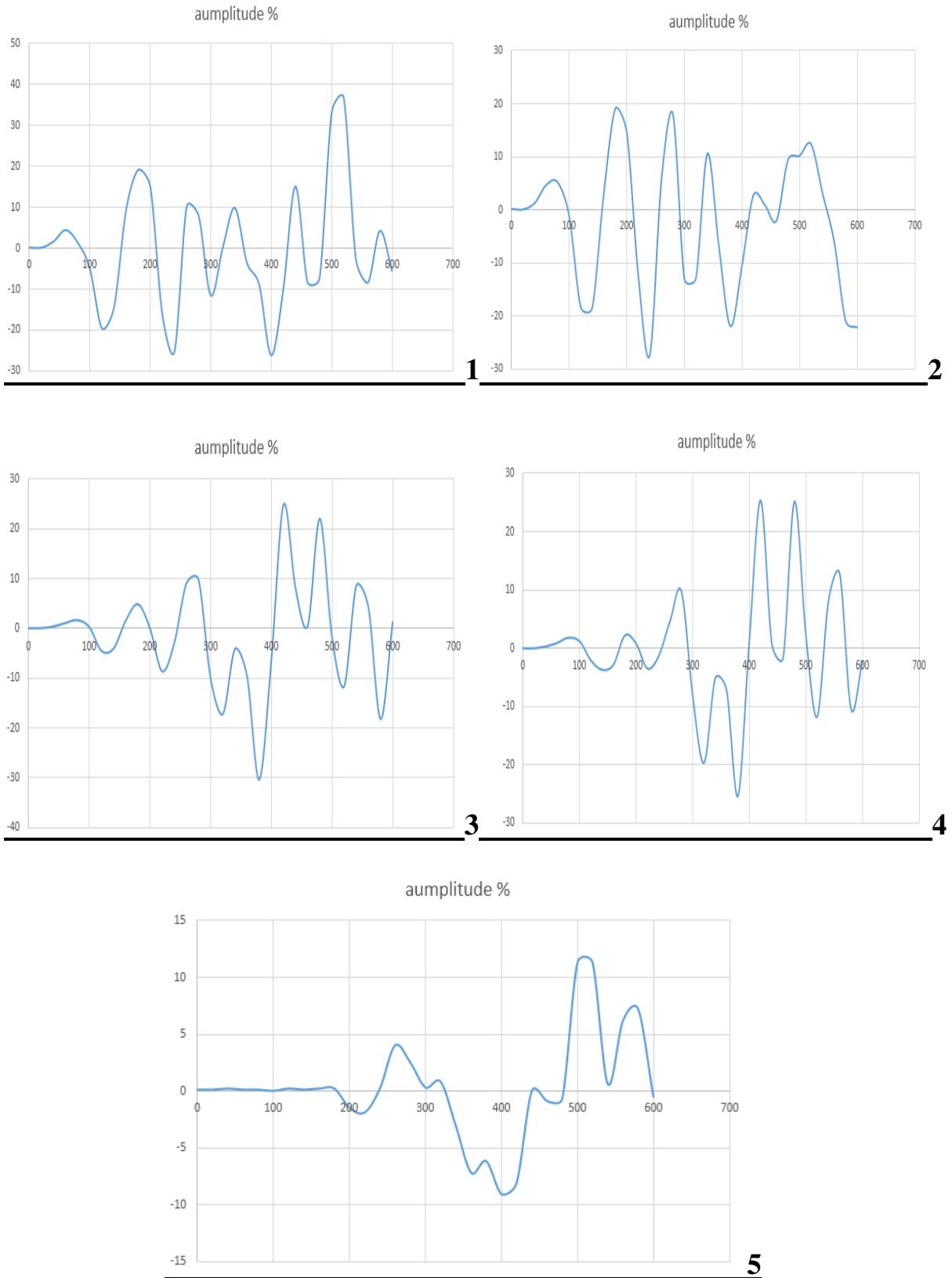


Figure [3.21] (1.2.3.4.5) -les graphes des signaux d'éprouvette de référence

2) l'éprouvette de 10% de sable

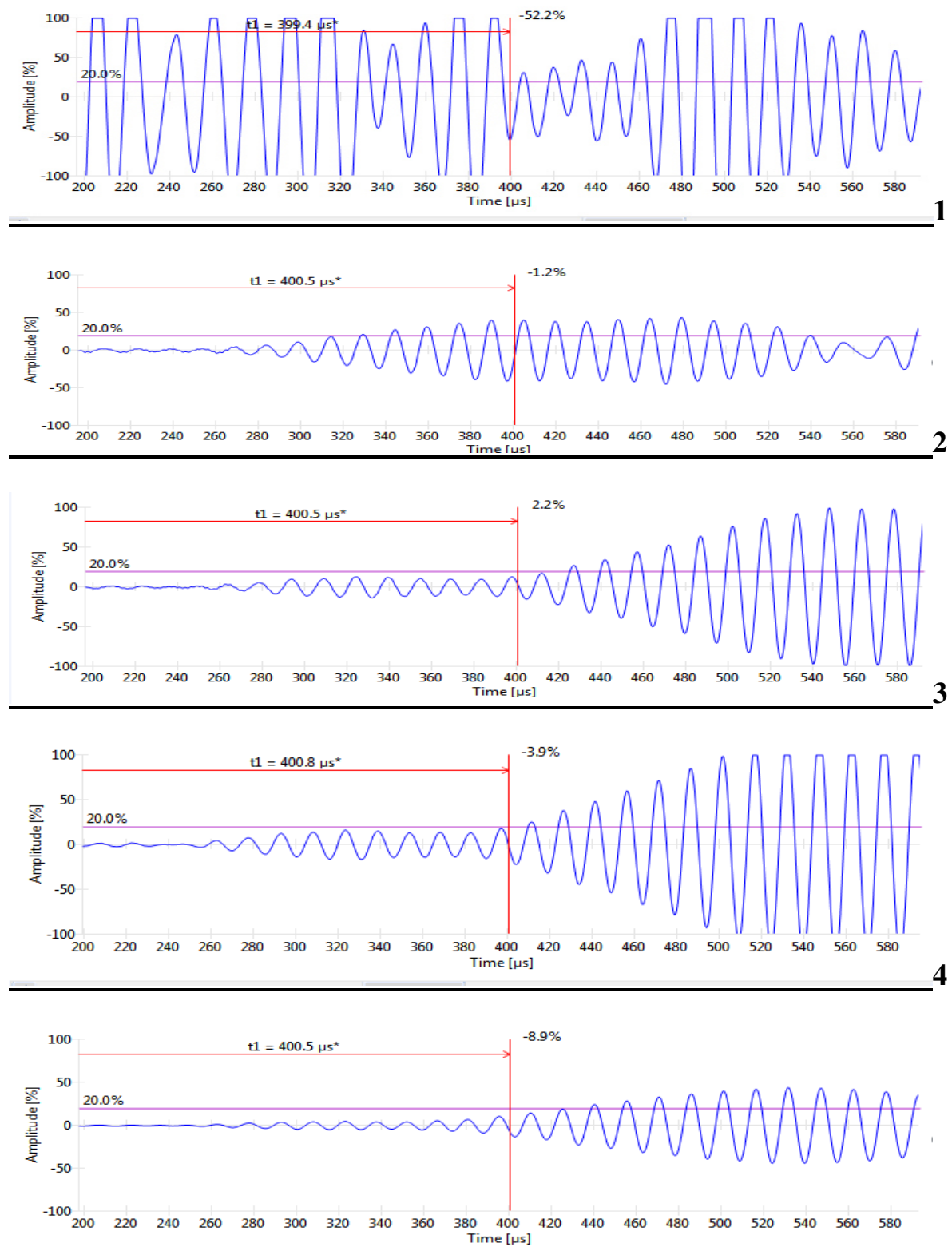


Figure [3.22] (1.2.3.4.5) -les signaux d'éprouvette de 10% de sable

CHAPITRE 03

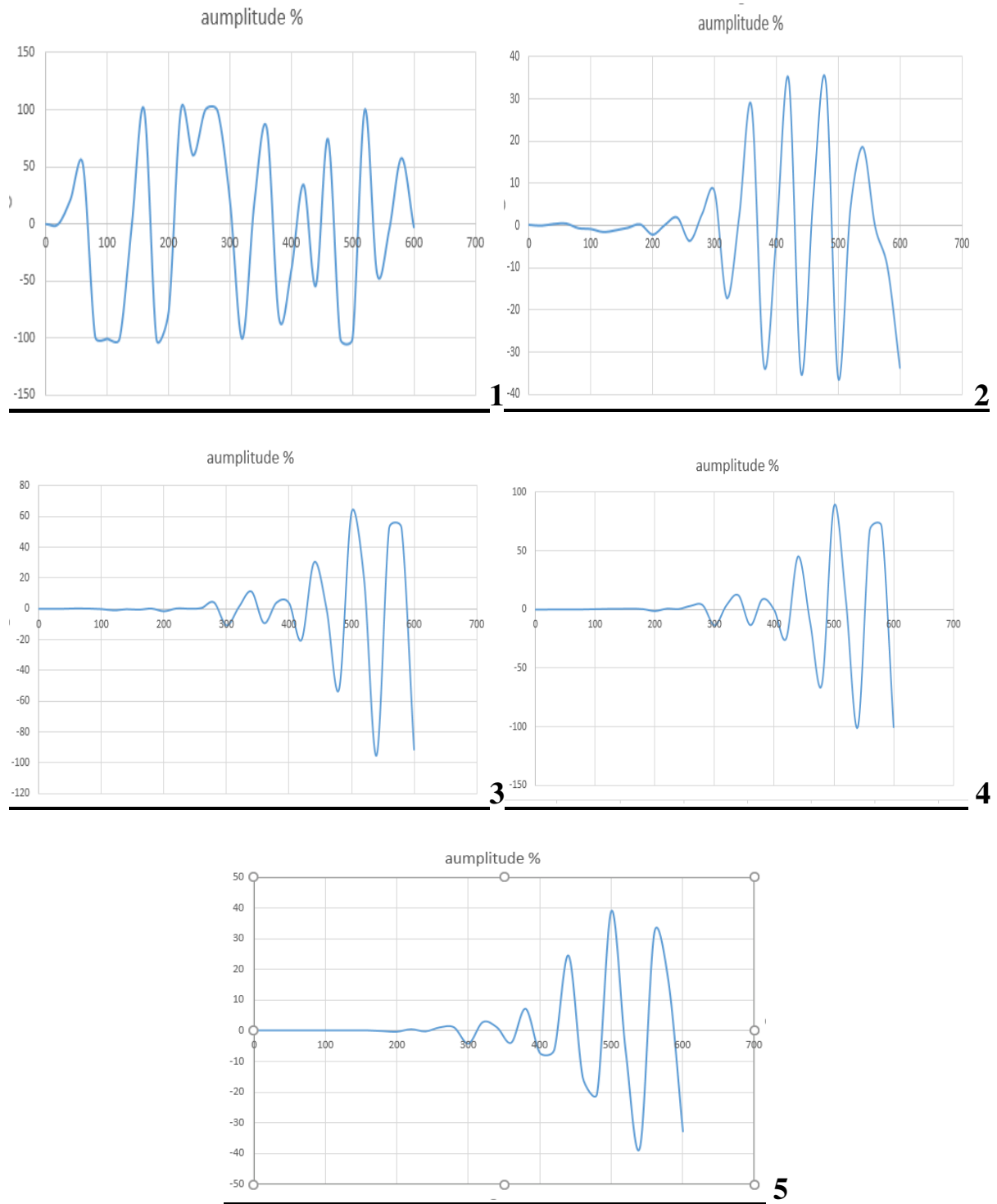


Figure [3.23] (1.2.3.4.5) -les graphes des signaux d'éprouvette de 10% de sable

3) l'éprouvette de 20% de sable

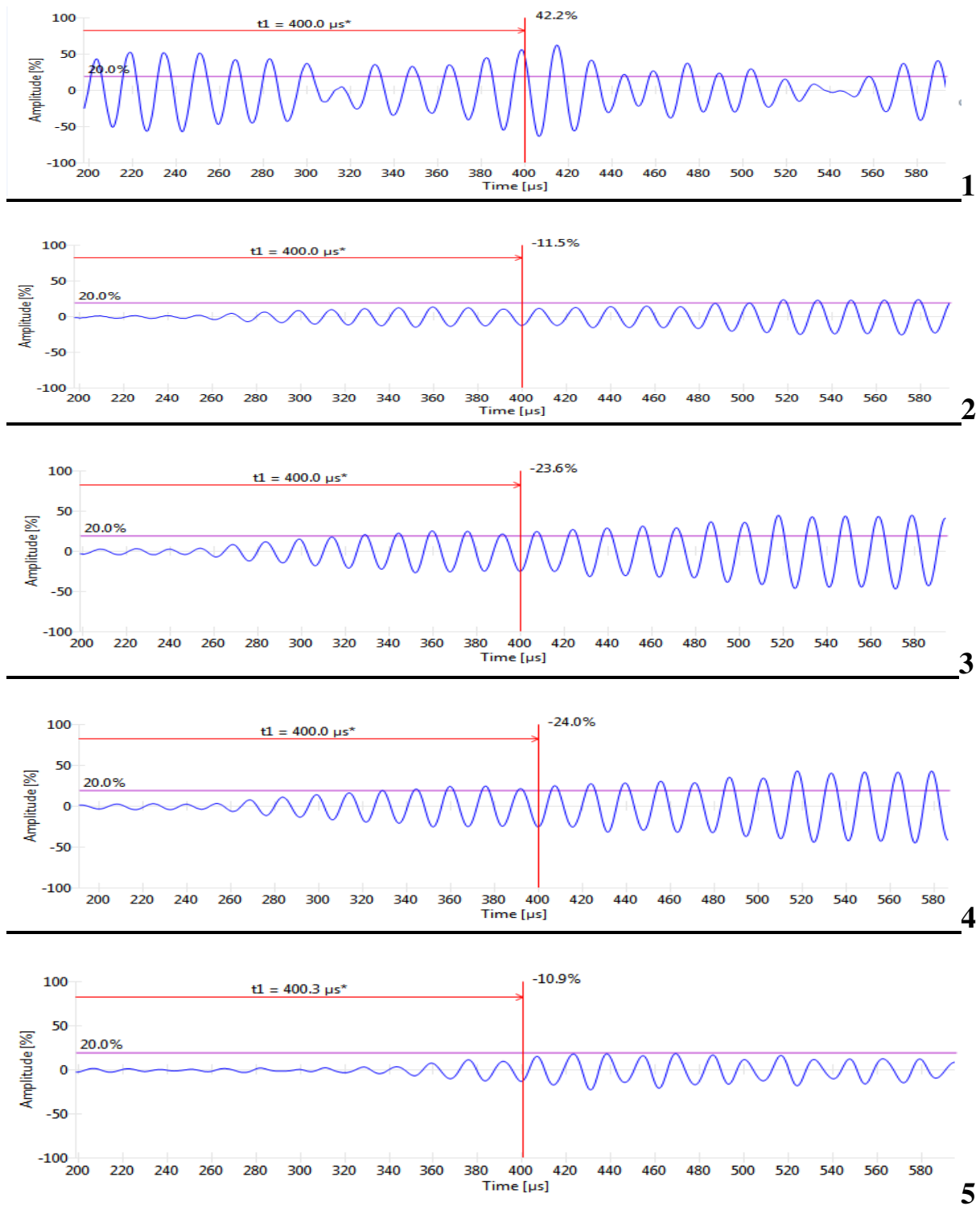


Figure [3.24] (1.2.3.4.5) -les signaux d'éprouvette de 20% de sable

CHAPITRE 03

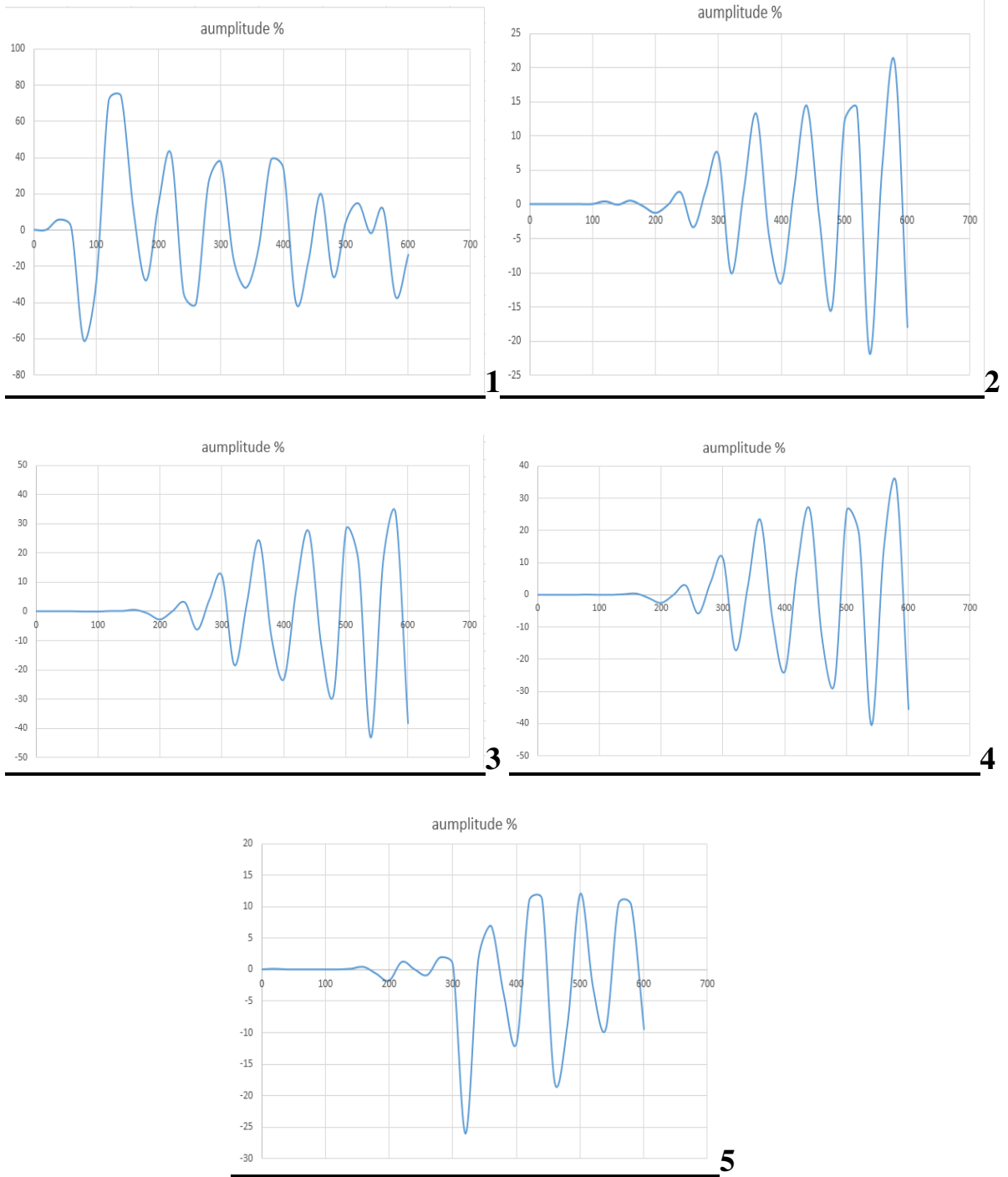


Figure [3.25] (1.2.3.4.5) -les graphes des signaux d'éprouvette de 20% de sable

4) l'éprouvette de 30% de sable

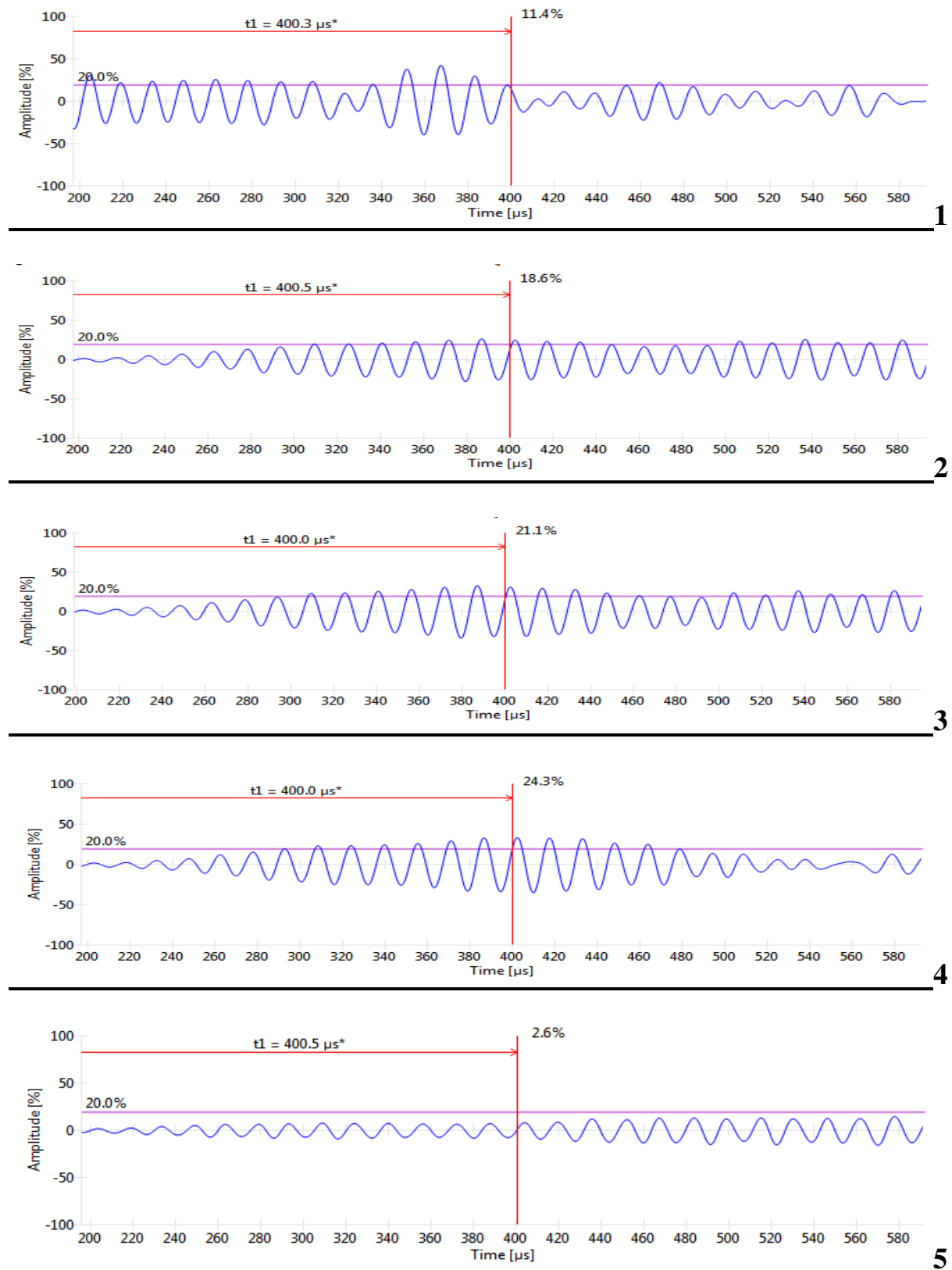


Figure [3.26] (1.2.3.4.5) -les signaux d'éprouvette de 30% de sable

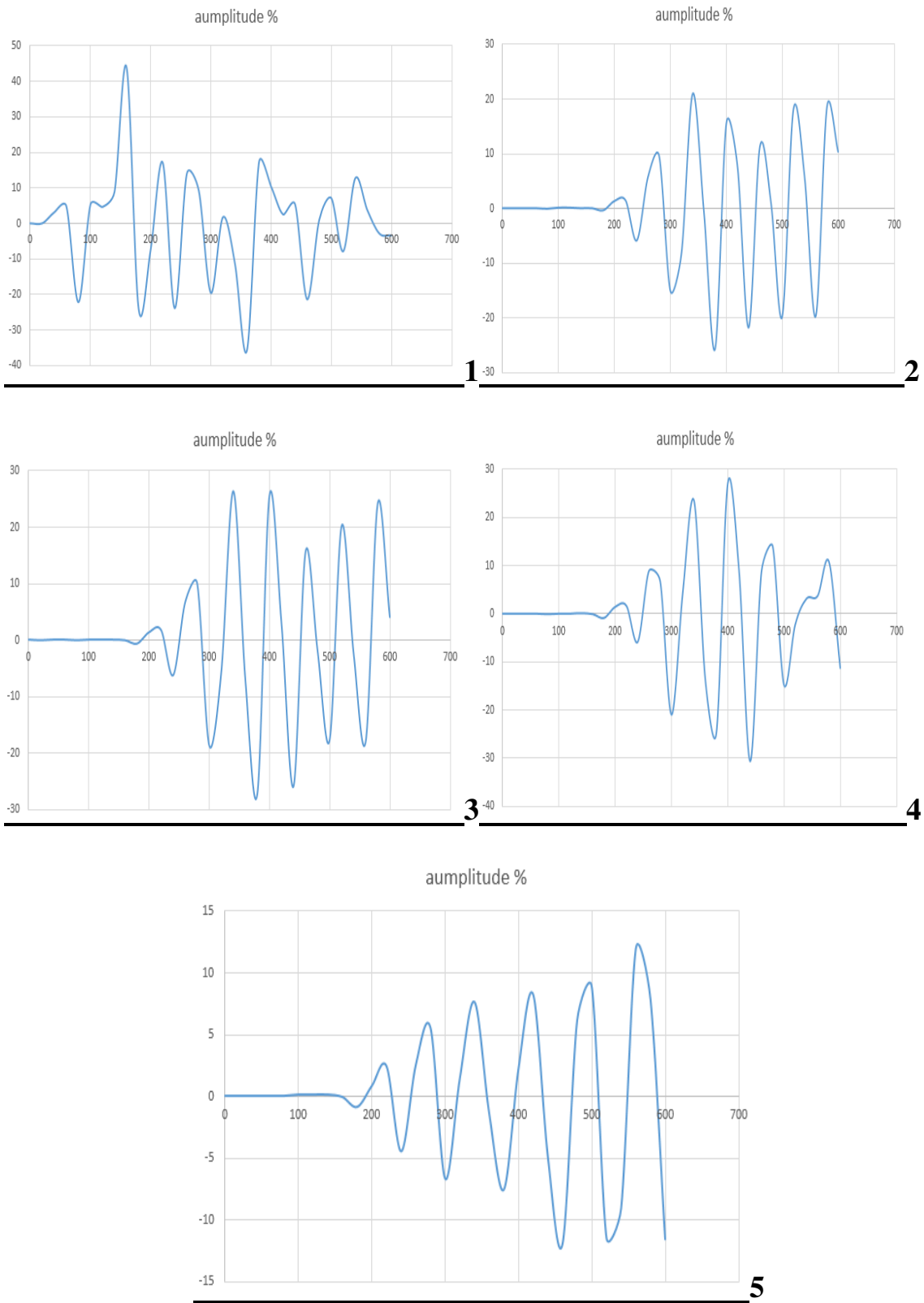


Figure [3.27] (1.2.3.4.5) -les graphes des signaux d'éprouvette de 30% de sable

5) Commentaire

Ces signaux sont ensuite analysés à l'aide de la méthode multi résolution et emploi des ondelettes pour déterminer l'endroit et le temps de début de fissure pour ces différentes éprouvettes et comparer le début d'apparition de la fissure ainsi que sa propagation.

4.1/ Introduction

L'acquisition des signaux lors des essais conduits au sein du laboratoire de Génie-Civil de la faculté des sciences et sciences appliquées et consignés dans le chapitre précédent pour différents défauts de dosage et graduellement chargées jusqu'à la rupture pour les différentes éprouvettes seront soumis et à différents points à une étude par ondelettes exposée dans ce chapitre afin de déterminer le point de départ et l'instant de provocation ainsi que l'évolution des fissures dans l'éprouvette et cette méthode est utilisée dans divers domaines comme la reconstitution d'images (reconnaissance faciale) .

Le béton est l'un des matériaux synthétiques les plus utilisés dans le monde. Néanmoins, la recherche de techniques simples, efficaces et peu coûteuses pour optimiser les performances du béton et contrôler son comportement structurel est un véritable défi que nous devons relever. Dans un souci de sécurité et d'économie, des méthodes de prévision des performances des ouvrages en béton sont devenues nécessaires, notamment dans les pays en développement. Parmi les causes d'endommagement du béton, la surcharge mécanique semble être la plus fréquente. Les microfissures (voir par exemple la figure 1 a) peuvent être provoquées par des contraintes mécaniques, souvent locales. Ces microfissures peuvent évoluer et se propager dans la structure et provoquer des dommages irréversibles. Pour cette raison, la surveillance des fissures est essentielle. Opérationnellement, cette surveillance est généralement réalisée en évaluant régulièrement les débuts de fissures superficielles par des moyens optiques ou des extensomètres. Cependant, avec ces méthodes classiques, les dommages internes ne sont pas détectables, d'où le recours accru aux contrôles non destructifs pour détecter les fissures à un stade précoce. Le béton est un mélange de quatre matériaux principaux : ciment Portland, granulats grossiers, granulats fins et eau, et pour un usage industriel, des adjuvants minéraux et chimiques sont ajoutés pour accélérer ou retarder son adhérence et améliorer ses performances [27,28]. Les quantités de ces éléments sont réglementées pour une qualité requise par la finalité de la construction de l'ouvrage, tels que les ponts à grande portée (voir Figure 1 b)), les ouvrages souterrains spéciaux (voir Figure 1 c)), les centrales nucléaires (voir Figure 2). Un excès ou un défaut de la quantité requise d'un des éléments constitutifs, ou une vibration inappropriée des éléments mélangés initiaux provoque des défauts tels que ségrégation ou fissures prématurées dues au retrait du béton. De plus, la présence de bulles d'air provoque des discontinuités dans le matériau (voir figure 1).



Figure [4.1] - Exemples de fissures dans le béton : a) Microfissures typiques ; b) Inspection conventionnelle des fissures des ponts ; c) Fissures le long d'une dalle dans un centre commercial.

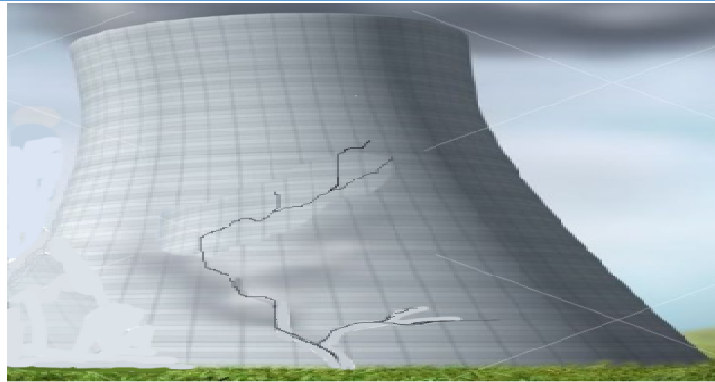


Figure [4.2] - Centrale nucléaire : réacteur de fusion

Ces défauts affectent la résistance du béton et sa durabilité [29]. Exposé à des environnements agressifs ou à des variations de température, des défauts visibles et non visibles apparaissent, et la qualité et la résistance du béton diminuent. Sous contrainte de compression, ce matériau se comporte bien, contrairement aux contraintes de traction qui peuvent provoquer des dommages importants. Dans une éprouvette de béton soumise à des contraintes de compression, les contraintes sont concentrées sur des éléments rigides avec un module d'élasticité appréciable. Ce matériau étant hétérogène, une charge externe crée en son sein un état complexe et une concentration de contraintes autour des vides d'air [30]. Les essais non destructifs (CND) [31] sont un ensemble de méthodes couramment utilisées pour caractériser l'état d'intégrité des structures, sans les dégrader, soit lors de la production (par exemple lors de la construction d'ouvrages ou de bâtiments), soit lors de l'utilisation ou du service [32,33]. Le développement des méthodes CND a commencé dans les années 60 pour répondre aux demandes de secteurs tels que l'énergie nucléaire, l'aéronautique et le spatial. Le CND a progressivement élargi son champ d'application, passant du strict domaine de la détection, de la reconnaissance et du dimensionnement des défauts localisés à l'évaluation des caractéristiques intrinsèques des matériaux. La notion de défaut (ou faute) est définie en fonction de l'usage qui sera fait du produit (satisfaction du client final). Dans le cas de la détection précoce des fissures du béton et surtout en cas de dommages internes, le CND est l'outil idéal non seulement pour la détection des fissures mais aussi pour le suivi de leur propagation [34,35]. L'objectif principal de cette étude est de proposer une technique originale de détection de fissures structurelles dans le béton en utilisant un système de contrôle non destructif par ultrasons pour scanner le béton couplé à une méthodologie d'évaluation basée sur l'analyse multi résolution et l'apprentissage profond.

4.2/ Matériels et méthodes

➤ 5.2.1/ Méthodes CND Les méthodes et techniques de CND les plus couramment utilisées [36] sont les CND optiques [37], les CND par ultrasons [38], les tests d'émission acoustique [39], les CND radiographiques [40,41,42], les tests par courants de Foucault [43], les tests électromagnétiques CND [44], systèmes laser [45], méthodes sclérométriques [46] et thermographiques [47] pour évaluer la durabilité des structures en béton par contact et sans contact. La figure 3 montre les principales techniques de CND pour les structures en béton. Dans cette étude, l'analyse de la propagation des ondes ultrasonores [48,49,50] est réalisée à l'aide de 2 capteurs situés de part et d'autre de l'échantillon analysé (voir Figures 4 et 5).

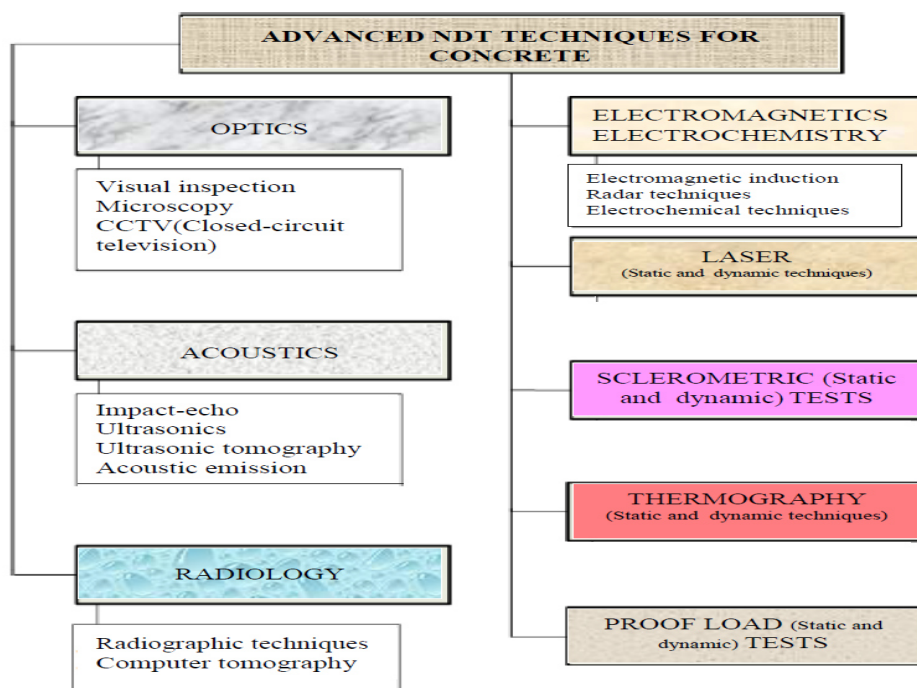


Figure [4.3] - NDT techniques pour structures en béton.

Les figures 4 et 5 montrent les dispositifs utilisés expérimentalement pour déterminer la présence ou l'absence de fissures dans le béton soumis à compression.

L'appareil à ultrasons utilisé est un Pundit L200 de la société Proceq. La presse utilisée est une presse à compression monobloc 3R d'une capacité de 2000 KN à 3000 KN adaptée aux essais spécifiques sur éprouvettes de béton de forme cylindrique.

L'éprouvette est de dimension normalisée, cylindrique de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm. Son poids est de 15 kg.

L'échantillon d'essai a plus de 90 jours. La vitesse de charge est de 0,05 MPA/seconde.

CHAPITRE 04

Le temps de transit du signal varie de 32,3 à 71,4 microsecondes lorsque la force de compression varie de 0 à 470 kN.

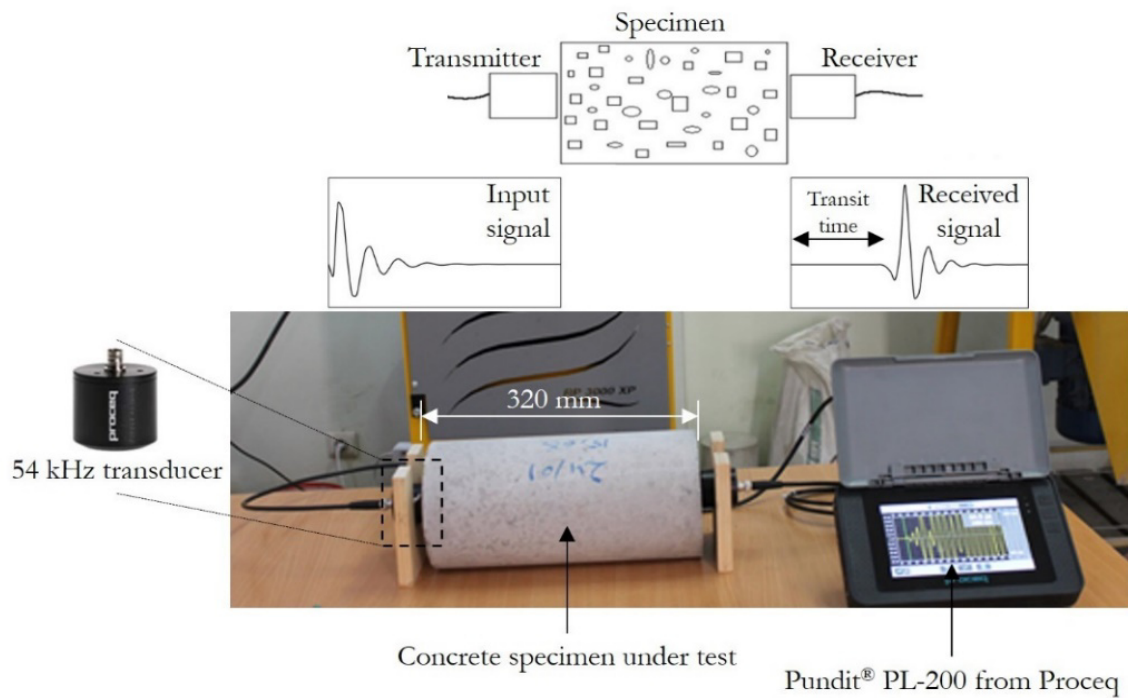


Figure [4.4] - Dispositif expérimental : Méthode non-destructive à l'aide de l'ultrason (NDT).

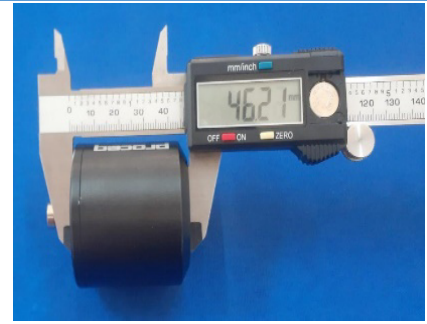
2,000-3,000 kN one-piece compression
testing machine from 3R



Figure [4.5] - Ultrasonique NDT durant la compression des éprouvettes de béton.



Transducteur diamètre



Transducteur lent



2 transducteurs, 2 BNC câble and couplant + calibration rod.

Figure [4.6] - Quelques spécifications des sensors et leurs utilisations.

Tableau [4.1]- Technical specifications of the sensors used in our NDT experiments.

Technology	Frequency	Wavelength	Maximum grain size	Bandwidth	Pulse shape	Weight
P-wave transducer	54 kHz \pm 5 kHz	68.5 mm	34 mm	< 10 kHz	Square wave	287 g

L'originalité de notre travail réside dans le fait que nous utilisons, d'une part, la méthode CND par ultrasons pour identifier d'éventuelles fissures et, d'autre part, cette méthode est combinée à une analyse multi-résolution basée sur des ondelettes pour analyser les fissures et leur taille à différentes échelles, notamment au début du processus de fissuration du béton. L'objectif final est de classer automatiquement ces fissures par apprentissage profond et de permettre leur identification selon le type.

➤ **4.2.2/ Analyse multi résolution basée sur des ondelettes**

L'idée d'analyse multi-résolution [51] d'un signal repose sur le fait que le signal est décomposé sur une très large gamme d'échelles, opération comparable à une cartographie.

CHAPITRE 04

A chaque échelle, le signal sera remplacé par l'approximation la plus adéquate qui puisse être tirée. En passant des échelles les plus grossières aux échelles les plus fines, on accède à des représentations de plus en plus précises du signal donné. L'analyse se fait en calculant ce qui diffère d'une échelle à l'autre, c'est-à-dire les détails à une résolution donnée. Ceci permet, en corrigeant une approximation encore assez grossière, d'atteindre une représentation de meilleure qualité. Une représentation acceptable des données à visualiser doit être hiérarchique et doit atteindre les objectifs suivants [52] : - vue globale à une résolution arbitraire, - vue locale exacte, - transmission progressive par réseau, - compression. De plus, les algorithmes atteignant ces objectifs devraient avoir un coût de calcul moyen minimal en temps et en espace, typiquement $O(N)$ où N est la taille du signal analysé.

Toutes ces caractéristiques sont remplies par la représentation hiérarchique des données basée sur une analyse de transformée en ondelettes multi résolution. Ces méthodes d'analyse multi résolution permettent une représentation du signal à plusieurs niveaux de résolution en stockant le niveau de résolution le plus grossier, ainsi que les erreurs entre niveaux successifs. Ce codage par erreurs successives, plutôt que par stockage de tous les niveaux de résolution, explique le coût linéaire dans l'espace des algorithmes d'analyse multi résolution. Les erreurs sont codées par les coefficients de détail. Chacun de ces coefficients est associé à une fonction de base, appelée ondelette en raison de son comportement oscillant, et de sa localité. Les applications qui nous intéressent dans le cadre de la visualisation résultent de la sélection de certains coefficients de détail - et de la suppression d'autres - après l'analyse, et avant la synthèse. Cette sélection est basée sur les propriétés d'orthogonalité et de localité de la base d'ondelettes. Les propriétés d'orthogonalité relient l'erreur causée par la suppression des coefficients de détail à la valeur de ces coefficients : l'erreur sera faible si les coefficients de faible amplitude sont supprimés. Les propriétés de localité permettent de spécifier la zone influencée par la suppression d'un coefficient de détail. Ainsi, pour obtenir une vue globale à une résolution arbitraire, nous pouvons sélectionner le pourcentage souhaité des coefficients de détail les plus significatifs (c'est-à-dire le plus grand en valeur absolue). La compression est basée sur le même principe. La transmission progressive est optimisée en transmettant les coefficients de détail par ordre de grandeur décroissant.

Enfin, une vue locale exacte est obtenue en sélectionnant tous les coefficients de détail dont la zone d'influence coupe la région à visualiser. Ces propriétés expliquent pourquoi l'analyse multi résolution a déjà été utilisée avec succès en visualisation, par exemple pour la visualisation de données médicales volumétriques ou de données océanographiques.

CHAPITRE 04

Dans cette étude, l'analyse multi résolution est utilisée pour la visualisation des fissures dans le béton. Chercheurs, ingénieurs et praticiens dans divers domaines tels que le multimédia [53], les télécommunications [54,55], la médecine et la biologie [56 ;57], le suivi des fissures et la détection des fractures [58,59,60], la mécanique des fluides [61] la thermodynamique [62], l'astrophysique [63], la finance [64,65] traitent quotidiennement des données à différentes échelles d'analyse, en termes de classification, segmentation, détection, débruitage [66], compression, synthèse ou reconstruction , etc. Mais l'analyse par transformée en ondelettes multi résolution impose des restrictions qui empêchent certains types de visualisations, voire interdisent la visualisation de certains types de données. Par exemple, une analyse en ondelettes (de première génération) n'est pas capable de produire une analyse selon toutes les orientations d'une image (seules les composantes horizontale, verticale et diagonale sont prises en compte). D'où l'émergence de nouveaux paradigmes appelés ondelettes de 2e ou 3e génération tels que les ridgelets [67], les curvelets [68], les contourlets [69], les bandelettes [70], etc. La figure 7 résume le principe de l'analyse multirésolution pour trois niveaux de résolution basés sur des ondelettes. Le signal S est d'abord décomposé au 1er niveau de résolution en une approximation A1 et un détail D1, puis au 2ème niveau de résolution, l'approximation A1 est décomposé en une approximation A2 et un détail D2, et enfin au 3ème niveau de résolution,

L'approximation A2 est à son tour décomposé en une approximation A3 et un détail D3.

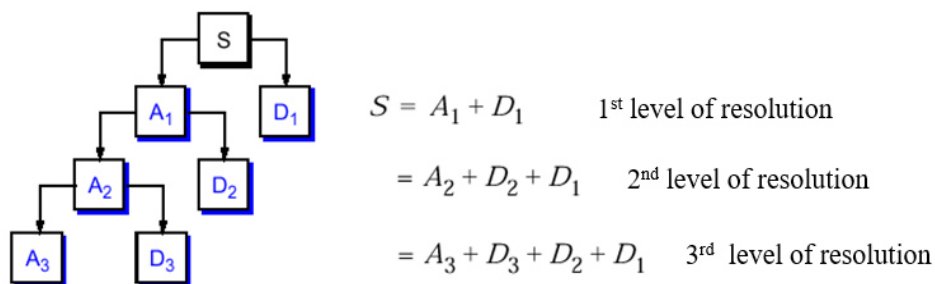


Figure [4.7] -Décomposition d'un signal S sur trois niveaux. A et D représentent respectivement l'approximation et le détail du signal.

Le signal ainsi analysé peut s'écrire comme suit :

L'ondelette choisie, notée $\psi(t)$, doit satisfaire la propriété suivante

$$\int_{\mathbb{R}} t^p \psi(t) dt = 0, \quad \forall 0 \leq p < n \quad (2)$$

Où : n contrôle le nombre d'oscillations de $\psi(t)$. Cette relation signifie que $\psi(t)$ « tue » les polynômes de degré p pour $p < n$. La transformée en ondelettes $W_x(u,s)$ d'un signal X au temps u et à l'échelle s est définie par (3).

$$W_x(u,s) = \int_{\mathbb{R}} X(t) \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt$$

Où : ψ^* désigne le conjugué complexe de ψ . Les expressions (2) et (3) montrent que $W_x(u,s)$ n'est pas affecté par un signal représenté par un polynôme de degré inférieur à n. En revanche, $W_x(u,s)$ est sensible aux variations irrégulières. Cette caractéristique de la transformée en ondelettes a une importance majeure dans la détection de singularité, en particulier dans la détection et la surveillance de fissures. La transformée en ondelettes discrète (DWT) est donnée par l'équation. (4).

$$d_x(j,k) = W_x(u = 2^{-j}k, s = 2^{-j}) \quad (j,k) \in \mathbb{Z}^2$$

Il est évident que pour éviter la redondance, la famille $\{\psi_{j,k}\}_{(j,k) \in \mathbb{Z}^2}$ doit être une base orthonormée. Cette propriété de l'ondelette permet d'obtenir une transformée en ondelettes rapide. La transformation en ondelettes rapide est calculée par une cascade de filtrage passe-bas par h et de filtrage passe-haut par g suivi d'un échantillonnage descendant (voir figure 5). Sur la figure 5, a_{-j} (ou $a_X(j,k)$, où k représente le temps) et d_j où $d_x(j,k)$ sont appelés respectivement coefficients d'approximation et coefficients d'ondelettes (ou détails) de la signal au niveau j. De plus, le symbole $\downarrow 2$ représente la décimation (down sampling) symbolisant la conservation d'un échantillon sur deux.

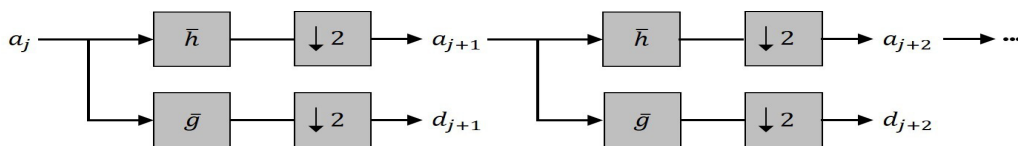


Figure [4.8] - Transformation en ondelettes rapide ou analyse multi résolution

4.3/ Méthodologie proposée

La méthodologie proposée La figure 04 montre un aperçu de la méthodologie proposée pour détecter automatiquement les fissures internes dans un échantillon de béton via une combinaison d'essais non destructifs, d'analyse multi résolution et d'étapes de classification. Comme le montre la figure, la méthodologie se compose de 3 étapes principales, à commencer par le contrôle non destructif (CND) de l'éprouvette de béton qui produit un signal ultrasonore qui détecte la présence d'un défaut interne.

Ce signal passe ensuite à l'étape 2 et subit une analyse multi résolution via une transformée en ondelettes discrète (DWT). Un scalogramme est construit à partir du signal ultrasonore transformé pour fournir une image à l'échelle spatiale permettant de localiser la fissure dans l'espace et à chaque résolution. L'image du scalogramme est ensuite introduite dans l'étape 3 du procédé consistant en le bloc CNN qui extrait les caractéristiques pertinentes de l'image du scalogramme qui identifient le type de défaut interne et le classe finalement en tant que fissure ou non-fissure.

4.4/ Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé une méthode originale pour la détection et le suivi des fissures dans les structures en béton. Cette méthode se concentre sur les fissures internes ou sur le début de fissures invisibles de l'extérieur. De telles fissures sont détectées par CND ultrasonore et analysées par ondelettes fournissant une image à l'échelle spatiale permettant de localiser la fissure dans l'espace et à chaque résolution. L'ondelette choisie pour cette analyse multi résolution est l'ondelette Daubechies10. Ceci présente une forte corrélation avec le signal analysé. De plus, visuellement, il existe une forte ressemblance entre le signal ultrasonore reçu et l'ondelette Db10. De plus, cette ondelette est orthogonale et largement utilisée pour détecter les discontinuités de signal et les fissures dans les structures. L'image multi résolution résultante correspondant au module carré de la transformée en ondelettes du signal ultrasonore reçu est ensuite soumise à un processus de classification crack/non-crack basé sur le Deep Learning (AlexNet, ResNet). Nous avons montré qu'il est possible d'atteindre une précision de 90 %. Un tel résultat est très positif et montre que notre démarche est incontournable lorsqu'il s'agit de « sécuriser » des structures économiques vitales comme les centrales nucléaires et les barrages où l'initialisation d'une fissure optiquement invisible peut provoquer des catastrophes majeures. Le coût d'un tel protocole est faible de l'ordre de 5000 \$ puisque la méthode ne nécessite que l'utilisation d'un appareil à ultrasons portable sur site et d'un processeur ordinaire, soit une carte DSP ou un ordinateur portable puisque nous mettons en œuvre une architecture qui a al -ready appris à détecter et à suivre les fissures internes ou les démarrages de fissures possibles.

REFERENCES

Références :

1. Hassoum, M.N.H.; El-Manaseer, A. Structural concrete: Theory and design, John Wiley & Sons, 2015. <https://www.wiley.com>
2. Bernier, G., Formulation des bétons, Techniques de l'ingénieur. Réf. : C2210 V2, 2004. <https://www.techniques-ingenieur.fr>
3. Mehta, P. K.; Monteiro P. J. M. Concrete, Microstructure, Properties and Materials, The McGraw-Hill Companies, 2006. <https://www.scirp.org>
4. Mehta, P. K. Durability – Critical Issues for the future. Concrete International 1997, 9, 27-33. <https://www.sefindia.org>
5. Verma, S. K.; Bhadauria, S. S.; Akhtar, S. Review of Nondestructive testing methods for condition monitoring of Concrete Structures. Journal of Construction Engineering 2013, 2013, 11. <https://www.semanticscholar.org>
6. Femmam, S. ; M'sirdi N. K. ; Ouahabi A. Perception and characterization of materials using signal processing techniques. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurements 2001, 50, 5, 1203-1211. <https://www.researchgate.net>
7. Ouahabi, A. Multifractal analysis for texture characterization: A new approach based on DWT. In Proceedings of the 10th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (IEEE/ISSPA), Kuala Lumpur, Malaysia, 2010, 698-703. <https://www.researchgate.net>
8. patrick guiroud article Avril 2018-infociments <https://infociments.fr>.
9. Maxime Le Grumelec, le 30 Janvier 2020 – GROUPE AUDEMARD TERALRA <https://blog.teralta-audemard.com>
10. patrick guiroud article Septembre 2016-infociments. <https://infociments.fr>.
11. livre pratique du calcul du béton armé. <https://www.eyrolles.com>.
12. Bruno menja 11 Avril 2017-BILP. <https://maconnerie.bilp.fr>
13. M. contant "confection de bétons légers, la fabrication d'éléments architectaux " montréal 14 Avril 2000. <http://thesis.univ-biskra.dz>
15. article infociment Septembre 2019. <https://infociments.fr>
16. Michel cotte. Eu unuversalis.fr. <https://www.universalis.fr>
17. livre PIERRE-CLAUD AITCIN "Bétons HAUTE PERFORMANCE" 17 Janvier 2001. <https://www.editions-eyrolles.com>
18. Article ARTISAN BETON 30 Novembre 2018. <https://artisanbeton.be>

REFERENCES

19. Moula Chouaib " la ségrégation du béton causes, prévention et remèdes" 25 Juillet 2020. <https://book4yours.blogspot.com>
20. Dominique boussuge « les principales dégradations du béton " journal de l'Agence 31 Mai 2020. <https://www.journaldelagence.com>
21. Jonthan Mai-NHU rapport d'études et recherches "corrosion des armatures" décembre 2015. <https://www.cerib.com>
22. Davide Monnetier "les différentes technologies de CND" 25 Novembre 2019. <https://metablog.ctif.com>
23. Perdijon, Le contrôle non destructif par ultrasons, Hermès, 1993. <https://www.librairie-gallimard.com>
24. J. Kouassi, Contribution à l'auscultation dynamique des superstructures par les mesures de la célérité et de l'atténuation des ondes planes élastiques-application au béton. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1989. <http://www.theses.fr>
25. Patrick Guiraud "fabrication de béton " infociment Mars 2017. <https://infociments.fr>
26. Xavier Jourdain "essais destructifs sur éprouvettes en béton" 12 Novembre 2018. <https://docplayer.fr>
27. Ait Aouit, D. ; Ouahabi A. Monitoring crack growth using thermography. Comptes Rendus Mécanique 2008, 336, 8, 677-683. <https://www.infona.pl>
28. Ait Aouit, D.; Ouahabi, A. Nonlinear Fracture Signal Analysis Using Multifractal Approach Combined with Wavelet. Fractals - Complex Geometry, Patterns, and Scaling in Nature and Society 2011, 19, 18, 175-183. <https://www.mdpi.com>
29. Ouahabi, A. Signal and Image Multiresolution Analysis, London (UK)/Hoboken (NJ-US), ISTE-Wiley, 2013. <https://www.wiley.com>
30. Denys, B. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. Construction and Building Materials 2012. 33, 139–163. <https://www.researchgate.net>
31. Zhu, Y.-K.; Tian, G.-Y.; Lu, R.-S.; Zhang, H. A Review of Optical NDT Technologies. Sensors 2011, 11, 7773-7798. <https://www.mdpi.com>
32. Girault, J.-M.; Ossant, F.; Ouahabi, A.; Kouame, D.; Patat, F. Time-varying autoregressive spectral estimation for ultrasound attenuation in tissue characterization. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 1998, 45, 3, 650-659. <https://ieeexplore.ieee.org>

REFERENCES

33. Zhao, L.; Kang, L.; S. Yao, S. Research and Application of Acoustic Emission Signal Processing Technology. *IEEE Access* 2019, 7, 984-993. <https://www.semanticscholar.org>
34. Liao, T. W.; Ni, J. An automated radiographic NDT system for weld inspection: Part I — Weld extraction. *NDT & E International* 1996, 29, 3 ;157-162. <https://www.semanticscholar.org>
35. Tang, S.; Chris Ramseyer, C.; Pratik Samant, P.; Liangzhong Xiang, L. X-ray-induced acoustic computed tomography of concrete infrastructure. *Applied Physics Letters* 2018, 112, 063504. <https://aip.scitation.org>
36. Zehani, S.; Ouahabi, A.; Oussalah, M.; Mimi, M.; Taleb-Ahmed, A. Trabecular bone microarchitecture characterization based on fractal model in spatial frequency domain imaging. *Int. J. Imaging Syst. Technol.* 2021, 31, 141-159. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
37. Chady, T. ; Enokizono, M. ; Sikora, R. Crack detection and recognition using an eddy current differential probe. *IEEE Transactions on Magnetics* 1999, 35, 3, 1849-1852. <https://ieeexplore.ieee.org>
38. Langenberg, K.-J; Mayer, K.; Marklein, R. Nondestructive testing of concrete with electromagnetic and elastic waves: Modeling and imaging. *Cement and Concrete Composites* 2006, 28, 4, 370-383. <https://www.infona.pl>
39. Ouahabi, A.; Depollier, C.; Simon, L.; Kouame, D. Spectrum estimation from randomly sampled velocity data [LDV]. *IEEE Trans. Instrum. Meas* 1998, 47, 4, 1005–1012. <https://www.researchgate.net>
40. Kowalski, R. ; Wróblewska, J. Application of a sclerometer to the preliminary assessment of concrete quality in structures after fire. *Archives of Civil Engineering* 2018, 64, 4, 171-186. <https://www.researchgate.net>
41. Foudazi, A. ; Edwards, C. A. ; Ghasr, M. T. ; Donnell, K. M. Active Microwave Thermography for Defect Detection of CFRP-Strengthened Cement-Based Materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2016, 65, 11, 2612-2620. <https://scholarsmine.mst.edu>
42. Girault, J.-M.; Kouamé, D.; Ouahabi, A.; Patat, F. Estimation of the blood Doppler frequency shift by a time-varying parametric approach. *Ultrasonics* 2000, 38, 1, 682-687. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>
43. Labat, V.; Remenieras, J.-P.; Matar, O.B.; Ouahabi, A.; Patat, F. Harmonic propagation of finite amplitude sound beams: experimental determination of the nonlinearity parameter B/A. *Ultrasonics* 2000, 38, 1-8, 292-296. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>

REFERENCES

44. Ouahabi, Y.R.; Bensadok, K.; OÙuahabi, A. Optimization of the Biomethane Production Process by Anaerobic Digestion of Wheat Straw Using Chemical Pretreatments Coupled with Ultrasonic Disintegration. *Sustainability* 2021, 13, 7202. <https://www.mdpi.com>
45. Sui, K.; Kim, HG. Research on application of multimedia image processing technology based on wavelet transform. *Image Video Processing* 2019, 24. <https://jivp-urasipjournals.springeropen.com>
46. Haneche, H.; Ouahabi, A.; Boudraa, B. New mobile communication system design for Rayleigh environments based on compressed sensing-source coding. *IET Communications* 2019, 13, 15, 2375–2385. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com>
47. Haneche, H.; Ouahabi, A.; Boudraa, B. Compressed Sensing-Speech Coding Scheme for Mobile Communications. *Circuits, Systems, and Signal Processing* 2021. <https://www.researchgate.net>
48. Djeddi, M.; Ouahabi, A.; Batatia, H.; Basarab, A.; Kouamé, D. Discrete wavelet transform for multifractal texture classification: Application to ultrasound imaging. In *Proc. of the 17th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2010, Hong Kong, 637-640*. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
49. Guetbi, C.; Kouamé, D.; Ouahabi, A.; Remenieras, J.-P. New emboli detection methods [Doppler ultrasound]. In *1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, An International Symposium (Cat. No.97CH36118), Toronto, Ont., Canada, 1997; pp. 1119-1122*. <https://mdpi-res.com>
50. Calvez, D. ; Roqueta, F. ; Jacques, S. ; Béchou, L.; Ousten, Y. ; Ducret, S. Crack Propagation Modeling in Silicon: a Comprehensive Thermo-Mechanical FEM Approach for Power Devices. *IEEE Transactions on Components Packaging Manufacturing Technologies* 2014, 4, 2, 360-366. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
51. Ouahabi, A.; Femmam, S. Wavelet-based multifractal analysis of 1-D and 2-D signals: new results. *Analog Integrated Circuits and Signal processing* 2011, 69, 1, 3-15. <https://www.researchgate.net>
52. Girault, J.-M.; Kouamé, D.; Ouahabi, A. Analytical formulation of the fractal dimension of filtered stochastic signal. *Signal Processing* 2010, 90, 9, 2690-2697. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
53. Schneider K.; Vasilyev O. V. Wavelet methods in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics. Annual Reviews* 2010, 42, 473-503. <https://www.annualreviews.org>

REFERENCES

54. Arneodo, A.; Bacry, E.; Muzy, J. F. The thermodynamics of fractals revisited with wavelets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 1995, 213, 1-2, 232-275. <https://www.sciencedirect.com>
55. De Moortel, I.; Hood, A.W. Wavelet analysis and the determination of coronal plasma properties. *Astronomy and astrophysics* 2000, 363, 269–278. <https://www.researchgate.net>
56. Ramsey, J. B. Wavelets in Economics and Finance: Past and Future. *Studies in Nonlinear Dynamics and Econometrics* 2002. 6, 3. <https://ideas.repec.org>
57. Struzik, Z. R. Wavelet methods in (financial) time-series processing, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 2001, Volume 296, Issues 1–2; pp. 307-319. <https://ideas.repec.org>
58. Ouahabi, A. A Review of Wavelet Denoising in Medical Imaging. In *Proceedings of the 8th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WoSSPA)*, Tipaza, Algeria, 12–15 May 2013, 19–26. <https://www.mdpi.com>
59. Do, M. N.; Vetterli, M. The finite ridgelet transform for image representation. *IEEE Transactions on Image Processing* 2003, 12, 1, 16-28. <https://ieeexplore.ieee.org>
60. Fadili, J.M.; Starck, J.-L. Curvelets and ridgelets, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* 2009, Volume 3; pp. 1718–1738. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
61. Sidahmed, S.; Messali, Z.; Ouahabi, A.; Trépot, S.; Messaoudi, C.; Marco, S. Nonparametric Denoising Methods Based on Contourlet Transform with Sharp Frequency Localization: Application to Low Exposure Time Electron Microscopy Images. *Entropy* 2015, 17, 3461–3478. <https://www.mdpi.com>
62. Ferroukhi, M.; Ouahabi, A.; Attari, M.; Habchi, Y.; Taleb-Ahmed, A. Medical video coding based on 2nd-generation wavelets: Performance evaluation. *Electronics* 2019, 8, 88. <https://www.mdpi.com>
63. Shen, X. ; Tian, X. ; Liu, T. ; Xu, F. ; Tao, D. Continuous Dropout. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 2018, 29, 9, 3926-3937. <https://tongliang-liu.github.io>
64. Ouahabi, A.; Taleb-Ahmed. A. Deep learning for real-time semantic segmentation: Application in ultrasound imaging. *Pattern Recognition Letters* 2021, 144, 27–34. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
65. Ilboudo, W. E. L. ; Kobayashi, T. ; Sugimoto, K. Robust Stochastic Gradient Descent With Student-t Distribution Based First-Order Momentum. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2020. <https://ieeexplore.ieee.org>

REFERENCES

66. Adjabi, I.; Ouahabi, A.; Benzaoui, A.; Taleb-Ahmed, A. Past, Present, and Future of Face Recognition: A Review. *Electronics* 2020, 9, 1188. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
67. Adjabi, I.; Ouahabi, A.; Benzaoui, A.; Jacques, S. Multi-Block Color-Binarized Statistical Images for Single-Sample Face Recognition. *Sensors* 2021, 21, 728. <https://www.mdpi.com>
68. Khaldi, Y.; Benzaoui, A.; Ouahabi, A.; Jacques, S.; Taleb-Ahmed, A. Ear Recognition Based on Deep Unsupervised Active Learning. *IEEE Sensors Journal* 2021, Accepted. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
69. Cha, Y.; Choi, W.; Büyüköztürk, O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 2017, 32; 361-378. <https://onlinelibrary.wiley.com>
70. Yamashita, R. ; Nishio, M. ; Do, R.K.G. ; Togashi, K. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging* 2018, 9, 611–629. <https://insightsimaging.springeropen.com>