

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Institut d'électronique et des télécommunications

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

Filière : ÉLECTRONIQUE

Spécialité : Électronique industrielle

Par

- **AMARA Naimat Ellah**
- **ZIANE Hibatallah**
- **MAOUCHE Amira**
- **ATTALAH Sihem**

Intitulé

***Etude et réalisation d'un système intelligent de détection sismique
et de surveillance des fissures pour la protection des structures***

Soutenu le : 30/06/2026

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. SAHLI Abdeslem</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BENTOUHAMI Larafi</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ZAIDI Elyazid</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadrant 2</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. DEBOUCHA Sadek</i>	<i>Pr</i>	<i>Co-Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ATTOUI Aissa</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ZEMMITE Fouad</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2025/2026

Dedicace

Je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce travail. Louange à Dieu pour Ses bienfaits.

À moi-même : À celle qui n'a pas abandonné, qui a bravé la fatigue et les doutes avec résilience. Merci d'avoir tenu bon et d'avoir honoré ta promesse.

À mon cher Père [Marwane] : À l'homme qui a tant sacrifié pour que mon chemin soit illuminé par le savoir, cachant sa fatigue pour me donner sa force. Mon cher papa, ma réussite est le fruit de ton noble combat, et mes larmes de joie sont le reflet de ton dévouement. Je te dédie ce succès, toi ma fierté et ma couronne. Que Dieu te préserve.

À ma tendre Mère [Rebouh Habiba] : À mon paradis sur terre, dont les prières silencieuses et le doux sourire ont apaisé mes nuits de fatigue. Ma chère maman, ce succès est le fruit de tes douâas et de ton amour inconditionnel. À toi, le battement de mon cœur, je dédie ce travail.

À mon cher Oncle et son Épouse [Sasi,Sabrina]: Merci pour votre soutien infaillible, vos mots d'encouragement et votre présence bienveillante à mes côtés.

À mes chères Tantes [Sasiya,Horiya,Zina] : Un grand merci à mes tantes pour leur présence chaleureuse, leur soutien précieux et d'avoir toujours été là pour m'encourager à chaque étape.

À mes Frères et Sœurs [Dalal,hocine,Hadil,Amin] : Mes piliers et ma source de joie. Merci d'avoir toujours été là pour partager mes ambitions et me soutenir.

À ma grande et chaleureuse famille [Amara] : À tous ceux qui portent ce nom, proches ou lointains. Merci pour votre fierté, votre bienveillance et vos encouragements qui m'ont toujours portée vers l'avant.

À mes chères binômes[Hiba,Amira,sihem] : Mes compagnes de lutte avec qui j'ai partagé le stress, la fatigue et les rires de ce projet de fin d'études. Merci pour votre esprit d'équipe et votre fraternité. Ce travail est notre réussite commune.

AMARA Naimat Ellah

Dédicace

Je dédie ce travail de fin d'études à mes très chers parents, ma mère [Nouara Hafs] et mon père [Boubekr] : en reconnaissance de leur amour, leurs sacrifices, leurs prières et leur soutien moral et matériel tout au long de mon parcours. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir offert les meilleures conditions pour réussir.

À ma chère sœur [Imane] : pour son encouragement, son affection, son soutien constant et toutes les responsabilités qu'elle a assumées pour moi.

À mon cher fiancé [Atef Otmani] : pour son amour, son soutien indéfectible, sa patience et sa présence à mes côtés tout au long de ce parcours.

À toute la famille [Hafs] : notamment mes chers oncles et tantes, pour leur amour, leur bienveillance et les valeurs qu'ils m'ont transmises. Une pensée particulière à ma grand-mère, que Dieu la protège et lui accorde une longue vie, ainsi qu'à mon grand-père, que Dieu lui fasse miséricorde.

À mes chères amies [Hibat Allah, Naimat Ellah, Sihem] : pour leur présence, leur aide et les beaux souvenirs partagés durant ces années d'études.

Enfin, je dédie ce travail à moi-même, pour les efforts fournis, la patience, la persévérance et la détermination qui m'ont permis d'atteindre cette étape importante vers mon objectif de devenir ingénieure.

MAOUCHE Amira

Dedicace

Toute ma gratitude envers Allah le Tout-Puissant, qui m'a guidée sur le chemin du savoir et m'accordé la persévérance nécessaire pour mener à bien ce projet.

À moi-même : À mon ambition, à ma patience face aux défis, et à cette volonté qui ne m'a jamais fait défaut. Je suis fière du chemin parcouru.

À mon cher Père [Hocine] : Le premier homme de ma vie, mon repère et ma source de force. Merci de m'avoir toujours poussée vers l'excellence et d'avoir cru en moi à chaque instant. Ce succès est avant tout le tien.

À ma merveilleuse Mère [Khaldi Samia] : La lumière de mes jours, dont l'amour inconditionnel et les douâs précieux ont tracé la voie de ma réussite. Tu es mon plus beau modèle de sacrifice. Que Dieu te garde pour moi.

À mes chers Frères [Maher] et [Oussama] : Mes précieux frères, mes alliés et mon soutien au quotidien. Merci d'avoir toujours été là pour m'épauler et m'encourager.

À ma chère Belle-sœur [Mani] et mes adorables Nièces [Mennat Allah, Maouda] : À ma belle-sœur pour sa gentillesse et ses encouragements, et à mes petites nièces qui apportent tant de joie et de fraîcheur à ma vie.

À la grande famille [Ziane] et [Khaldi] : À tous les membres de ma famille, proches ou lointains, pour leur bienveillance, leur fierté partagée et leurs vœux de réussite.

À mes chères amies [Niama, Amira, Sihem] : À mes amies fidèles, celles qui ont partagé mes moments de doute et mes éclats de rire durant ce parcours universitaire. Merci pour votre présence et votre amitié précieuse.

À mes chères amies intimes [Sadja, Amani, Khaoula, Achouaq, Hanine, Ikram, Basmala] : À mes amies les plus proches, mes sœurs de cœur, qui ont partagé mes secrets, mes moments de doute et mes plus grands éclats de rire. Merci pour votre soutien infaillible, votre écoute et votre amitié précieuse qui m'a tant entourée durant ce parcours.

ZIANE Hibatallah

Dedicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux. Louange à Allah, qui par Sa grâce et Son aide m'a permis de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie l'aboutissement de mes efforts et de mon travail en premier lieu à Allah Tout-Puissant, qui a éclairé mon chemin et m'a guidée à chaque étape de ma vie.

À moi-même, pour ma patience, ma persévérance et mon courage qui m'ont permis de surmonter les difficultés jusqu'à atteindre ce moment tant attendu, l'aboutissement de mes efforts et de mon travail.

À mon père, la couronne de ma tête [Attalah Mabrouk] : symbole de force et de persévérance, qui m'a appris la valeur du travail et de l'effort, et qui a toujours été ma fierté et mon honneur.

À ma mère, mon paradis [Abirez Nassima] : source de tendresse et d'amour inconditionnel, dont les prières ont été le secret de ma réussite et le pilier de mon existence.

À mes frères, ma fierté [Chams Eddine, Sohieb et Djalal] : qui ont été mon soutien et ma force, partageant avec moi les moments de joie et de difficulté.

À mon mari, mon soutien [Aroussi Hocine] : compagnon de vie et pilier de mon équilibre, qui m'a soutenue dans les moments difficiles comme dans les plus beaux instants.

À mon amie fidèle [Khobizi Douaa] : qui m'a accompagnée avec sincérité et loyauté tout au long de mon parcours.

À mes collègues de travail [Ziane Hibat Allah, Maouche Amira et Amara Naima Allah] : avec qui j'ai partagé effort, entraide et beaux souvenirs.

À mes chers enseignants, sources de savoir et de guidance, qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me conseiller. Qu'Allah les récompense abondamment.

À toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Je dédie ce succès, en priant Allah qu'il soit le début d'un avenir plein de réussite et de prospérité.

ATTALAH Sihem

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à **Allah**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous débutons ce travail en exprimant notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à nos directeurs de mémoire, le Docteur **BENTOUHAMI Larafi**, le Docteur **ZAIDI Elyazid**, et le Docteur **DEBOUCHA Sadek**. Leur confiance, leur suivi rigoureux et leur vision méthodologique ont été la pierre angulaire de l'accomplissement et du développement de ce projet. Nous les remercions pour leur apport scientifique continu et leurs précieux conseils qui nous ont inspirés tout au long de cette expérience.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur **YASSAAD Abdelbaki**, ingénieur de laboratoire, pour son aide précieuse, sa disponibilité et son soutien technique constant qui ont grandement facilité la réalisation de nos manipulations expérimentales.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel et aux responsables des laboratoires de Génie Civil.

Nous exprimons également notre considération à l'Université Mohamed Bachir El Ibrahim, et particulièrement au département d'Électronique.

L'équipe a l'honneur d'adresser ses plus profonds respects à Monsieur le Président et aux honorables membres du jury, pour avoir accepté de réviser et d'évaluer ce travail de fin d'études. Leurs futures remarques constitueront assurément une valeur ajoutée majeure pour notre parcours scientifique et professionnel.

Nos remerciements s'adressent aussi à nos collègues du domaine de l'ingénierie, qui ont partagé avec nous leurs débats techniques et leurs idées constructives durant les phases de conception et de réalisation de notre projet. Enfin, nous tenons à exprimer une gratitude immense à nos familles. Grâce à leurs prières sincères, leur soutien indéfectible et leur grande patience, nos efforts se couronnent aujourd'hui par la réussite.

Table des matières

Chapitre I Analyse du comportement dynamique des structures sous sollicitations sismiques et surveillance intelligente des fissures	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Problèmes des structures en zone sismique	4
I.2.1 Vulnérabilité des structures aux forces sismiques	4
I.2.2 Formation et propagation des fissures sous forces sismiques	5
I.2.3 Effets des fissures sur le comportement dynamique.....	5
I.2.4 Interaction sol-structure en zone sismique.....	6
I.3 Pathologies des structures	6
I.3.1 Types de fissures et leurs caractéristiques	6
I.3.2 Modélisation des fissures.....	9
I.3.3 Effets des fissures sur les fréquences naturelles	10
I.3.4 Pathologie des matériaux composites et FGM	10
I.4 Différentes méthodes de protection des structures	10
I.4.1 Fondations élastiques.....	10
I.4.2 Matériaux avancés pour la protection.....	12
I.4.3 Poutres composites	12
I.4.4 Méthodes numériques pour l'analyse et la protection	12
I.5 Utilisation de systèmes intelligents dans les structures civiles et industrielles .	13
I.5.1 Surveillance de santé structurale (SHM)	13
I.5.2 Capteurs et instrumentation	13
I.5.3 Modélisation numérique comme "jumeau numérique"	13
I.5.4 Intelligence artificielle et apprentissage automatique.....	14
I.6 Objectifs.....	14
I.6.1 Objectif général.....	14
I.6.2 Objectifs spécifiques.....	14

I.6.3 Objectif appliqué.....	15
I.7 Problématique	15
I.7.1 Problématique générale.....	15
I.8 Conclusion	15
Chapitre II Technologies de détection sismique et de surveillance des fissures.....	18
II.1 Introduction	18
II.2 Capteurs sismiques.....	18
II.2.1 Accéléromètres	18
II.2.2 Géophones	18
II.3 Capteurs de fissures.....	19
II.3.1 Jauges de déformation	19
II.3.2 Capteurs à fibre optique.....	19
II.3.3 Capteurs ultrasoniques.....	20
II.4 Systèmes d'acquisition de données	21
II.5 Communication des données.....	21
II.5.1 Communication par réseaux filaire	21
II.5.2 Communication par réseaux sans fil (WSN - Wireless Sensor Networks) ...	22
II.6 Comparaison des différentes technologies	23
II.6.1 Tableau comparatif des capteurs	23
II.6.2 Comparaison des technologies de communication.....	24
II.7 Tendances émergentes.....	25
II.7.1 Capteurs intelligents et auto-alimentés.....	25
II.7.2 Fusion de données multimodales.....	25
II.7.3 Intelligence artificielle et deep learning	25
II.7.4 Jumeaux numériques	26
II.8 Architecture globale du système	26
II.8.1 Architecture en trois couches	26

II.8.2 Flux de données	27
II.8.3 Schéma fonctionnel général du système.....	27
II.9 Choix des capteurs	28
II.9.1 Capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)	28
II.10 Unité de traitement (microcontrôleur / système embarqué).....	34
II.10.1 Rôle de l'unité de traitement	34
II.10.2 Choix du microcontrôleur Solution recommandée.....	34
II.11 Conclusion.....	36
Chapitre III Conception, simulation, réalisation et validation du système proposé	38
III.1 Introduction	38
III.2 Problématique.....	38
III.3 Objectifs du système de surveillance	39
III.4 Solutions techniques envisagées	39
III.5 Présentation des composants matériels (Hardware).....	40
III.5.1 Arduino Mega 2560	40
III.5.2 Le capteur d'accélération numérique (ADXL345)	41
III.5.3 Le capteur de vibration (SW-420).....	42
III.5.4 Le capteur d'humidité et de température (DHT11)	42
III.5.5 La Jauge de Contrainte (BF350-3AA)	43
III.5.6 Le Protocole de communication I2C (Inter-Integrated Circuit).....	44
III.5.7 Le module de communication GSM (SIM800L)	44
III.5.8 Le Régulateur de Tension Buck (LM2596)	45
III.5.9 Régulateur de tension linéaire LM7809	46
III.5.10 Le module lecteur de carte SD	47
III.5.11 L'afficheur LCD (Liquid Crystal Display)	47
III.5.12 Le Buzzer	48
III.6 Organigramme de l'algorithme de détection de séisme et de fissure.....	49

III.7	Volet Génie Civil : Protocole expérimental et confection des éprouvettes....	51
III.7.1	Procédure de réalisation des éprouvettes en béton armé.....	51
III.8	Conception et réalisation du circuit imprimé (PCB) via Proteus	55
III.8.1	Conception du schéma électronique général du système sous Proteus 8 ISIS.	55
III.8.2	Réalisation matérielle et procédé de fabrication chimique du PCB.....	58
III.8.3	Assemblage, soudage et intégration matérielle des composants.....	61
III.9	Conception et intégration du système dans son boîtier de protection description et aménagement matériel.....	62
III.10	Validation expérimentale globale du système	62
III.10.1	Validation de la détection des vibrations sismiques	62
III.10.2	Surveillance de la fissuration sous contrainte mécanique.....	64
III.11	Conclusion	69
	Bibliographie	72

Table des figures

Figure I-1 Dommages structurels causés par un séisme	5
Figure I-2 Initiation des microfissures dans les zones de concentration de contraintes	5
Figure I-3 Réduction de la rigidité due à la présence de fissures	6
Figure I-4 Transmission des ondes sismiques du sol vers la structure	6
Figure I-5 Différents types de fissures observées dans les structures en béton armé	6
Figure I-6 Fissures internes vs fissures externes	7
Figure I-7 Fissures simples vs fissures multiples	8
Figure I-8 Fissures verticales vs fissures inclinées.....	9
Figure II-1 Un capteur d'accélération ADXL345	18
Figure II-2 Un capteur sismique Géophone	19
Figure II-3 Capteur à fibre optique.....	20
Figure II-4 Capteur ultrasonique	20
Figure II-5 Communication par réseaux filaire	21
Figure II-6 Communication par réseaux sans fil	22
Figure II-7 Capteur intelligent.....	25
Figure II-8 Comparaison entre l'Intelligence Artificielle et le Deep Learning.....	26
Figure II-9 Principe de fonctionnement d'un jumeau numérique	26
Figure II-10 Flux de données.....	27
Figure II-11 Schéma fonctionnel général du système	28
Figure II-12 Capteur d'humidité et de température DHT11.....	29
Figure II-13 Capteur de vibration SW420	30
Figure II-14 Capteur d'accélération ADXL345	31
Figure II-15 Capteur jauge de contrainte BF350.....	32
Figure II-16 Arduino Mega 2560	35
Figure III-1 Arduino Mega 2560.....	40
Figure III-2 Capteur d'accélération numérique (ADXL345).	41
Figure III-3 Capteur de vibration piézo-mécanique (SW-420).	42
Figure III-4 Capteur numérique d'humidité et de température (DHT11).	43

Figure III-5 La Jauge de contrainte résistive (BF350-3AA).	43
Figure III-6 Un schéma du bus I2C	44
Figure III-7 Le module de communication (GSM SIM800L).	45
Figure III-8 Le Régulateur de tension Buck (LM2596).	46
Figure III-9 Régulateur de tension	47
Figure III-10 Le Module lecteur de carte SD	47
Figure III-11 L'Afficheur alphanumérique LCD	48
Figure III-12 L'Avertisseur sonore (Buzzer actif 5V).	48
Figure III-13 Organigramme de l'algorithme de détection de séisme et de fissure	50
Figure III-14 Étape de préparation, pesage et dosage des constituants	51
Figure III-15 Phase de malaxage mécanique du mélange	52
Figure III-16 Préparation et huilage des moules métalliques	52
Figure III-17 Confection et ligaturage de ferrailage	52
Figure III-18 Coulage de la couche d'enrobage	53
Figure III-19 Mise en place de l'armature en acier (Ferrailage)	53
Figure III-20 Remplissage final et serrage par vibration mécanique	53
Figure III-21 Surfaçage, finition et cure des éprouvettes	54
Figure III-22 Vue globale d'une mini-poutre en béton armé après décoffrage	54
Figure III-23 Processus de cure humide et immersion du premier lot d'éprouvettes	54
Figure III-24 Stockage à l'air libre (milieu sec) du second lot d'éprouvettes témoins	55
Figure III-25 Conception du schéma électronique général du système sous Proteus 8 ISIS.	56
Figure III-26 Modélisation et aperçu tridimensionnel (Rendu 3D) de la carte Shield finale sous Proteus 8.	57
Figure III-27 Routage des pistes de cuivre bi-couche et placement des empreintes sous Proteus 8 ARES.	58
Figure III-28 Processus d'insolation de la carte sous vide à l'aide de l'insoleuse U.V.	59
Figure III-29 Inspection visuelle des pistes de cuivre après l'étape de gravure chimique	59
Figure III-30 Inspection visuelle des pistes de cuivre après l'étape de gravure chimique	60
Figure III-31 Vue finale de la carte PCB "NASHIELD" nettoyée et prête pour le perçage	60
Figure III-32 Perceuse à colonne pour circuits imprimés (PCB).	61
Figure III-33 Différentes phases d'assemblage et de soudage manuel du Shield	61
Figure III-34 Vue globale du boîtier de protection finalisé avec ses interfaces externes	62
Figure III-35 Validation de la détection des vibrations sismiques	63

Figure III-36 Capture d'écran de l'appel et du SMS d'alerte reçu via le module GSM lors de la détection des vibrations.....	63
Figure III-37 Surveillance de la fissuration sous contrainte mécanique	64
Figure III-38 Capture d'écran de l'appel et du SMS d'alerte reçu via le module GSM lors de la détection des fissures	65

Liste des tableaux

Tableau II-1 Les principales technologies sans fil utilisées en SHM.....	22
Tableau II-2 Comparaison des principaux capteurs utilisés en SHM	24
Tableau II-3 Comparaison des technologies de communication	24
Tableau II-4 Architecture en trois couches	26
Tableau II-5 Caractéristiques techniques du capteur	29
Tableau II-6 Caractéristiques techniques principales.....	30
Tableau II-7 Caractéristiques techniques principales.....	31
Tableau II-8 Caractéristiques techniques du BF350	33
Tableau II-9 Comparaison des capteurs sélectionnés.....	34
Tableau II-10 Caractéristiques techniques de l'Arduino Mega 2560 Rev3	35
Tableau II-11 Comparaison entre l'Arduino UNO et l'Arduino Mega 2560	36

Liste des Symboles

Symbole	Signification
$E(y,z)$ (matériaux FGM)	Module d'Young, variable selon la position dans la section
B_{II}	Rigidité en flexion de la poutre
α	Angle d'inclinaison de la fissure
K_w	Rigidité du sol (module de Winkler)
$\bar{K}_w$	Paramètre adimensionnel de Winkler
$\bar{K}_p$	Paramètre adimensionnel de Pasternak
K_p	Rigidité de cisaillement de Pasternak
K	Rigidité du ressort de fondation
L	Longueur de la poutre
E_m	Module d'Young du matériau de la poutre
h	Hauteur de la section de la poutre
I	Moment d'inertie de la section
R_c	Réaction du sol (fondation viscoélastique)
C_d	Coefficient d'amortissement visqueux
ω	Déplacement transversal de la poutre
b	Largeur de la section de la poutre
y, z	Coordonnées dans la section transversale
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium
H_2SO_4	Acide sulfurique
$CaSO_4$	Sulfate de calcium
C	Masse de ciment (dosage du béton)
E	Masse d'eau (dosage du béton)
S	Masse de sable (dosage du béton)
G	Masse de gravier (dosage du béton)

g	Accélération de la pesanteur / unité d'accélération
V	Tension électrique (Volt)
A	Courant électrique (Ampère)
Ω	Résistance électrique (Ohm)
$^{\circ}C$	Température (degré Celsius)
Hz	Fréquence (Hertz)

Liste des Acronymes

Acronyme	Signification
<i>SHM</i>	Structural Health Monitoring (Surveillance de Santé Structurale)
<i>FGM</i>	Functionally Graded Material (Matériau Fonctionnellement Gradué)
<i>FG</i>	Fonctionnellement Gradué
<i>MEMS</i>	Micro-Electro-Mechanical Systems
<i>FEM</i>	Finite Element Method (Méthode des Éléments Finis)
<i>h-FEM</i>	Hierarchical Finite Element Method
<i>DQFEM</i>	Differential Quadrature Finite Element Method
<i>HSDT</i>	High-order Shear Deformation Theory
<i>NDT</i>	Non-Destructive Testing (Essais Non-Destructifs)
<i>UPV</i>	Ultrasonic Pulse Velocity
<i>SEM</i>	Scanning Electron Microscope
<i>BIM</i>	Building Information Modeling
<i>GWSHM</i>	Guided Wave Structural Health Monitoring
<i>FOS</i>	Fiber Optic Sensors (Capteurs à Fibre Optique)
<i>FBG</i>	Fiber Bragg Grating (Réseau de Bragg)
<i>BOTDR</i>	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
<i>OFDR</i>	Optical Frequency Domain Reflectometry
<i>DAQ</i>	Data Acquisition System (Système d'Acquisition de Données)
<i>WSN</i>	Wireless Sensor Networks (Réseaux de Capteurs Sans Fil)
<i>ISAC</i>	Integrated Sensing and Communication
<i>TENG</i>	Triboelectric Nanogenerator
<i>GSM</i>	Global System for Mobile communications
<i>GPRS</i>	General Packet Radio Service
<i>TCP/IP</i>	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
<i>AT</i>	Jeu de commandes Attention (modems)

<i>UART</i>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface
<i>I²C</i>	Inter-Integrated Circuit
<i>SDA</i>	Serial Data Line
<i>SCL</i>	Serial Clock Line
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion)
<i>FIFO</i>	First In, First Out
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display
<i>SD</i>	Secure Digital (carte mémoire)
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (Circuit Imprimé)
<i>CAO</i>	Conception Assistée par Ordinateur
<i>ISIS</i>	Intelligent Schematic Input System (module Proteus)
<i>ARES</i>	Advanced Routing and Editing Software (module Proteus)
<i>DRC</i>	Design Rule Check
<i>CRC</i>	Cyclic Redundancy Check
<i>NTC</i>	Negative Temperature Coefficient
<i>RH</i>	Relative Humidity (Humidité Relative)
<i>LED</i>	Light Emitting Diode
<i>LSB</i>	Least Significant Bit
<i>IHM</i>	Interface Homme-Machine
<i>IoT</i>	Internet of Things (Internet des Objets)
<i>Wi-Fi</i>	Wireless Fidelity
<i>LoRa</i>	Long Range
<i>NB-IoT</i>	Narrowband Internet of Things
<i>BLE</i>	Bluetooth Low Energy
<i>RCC</i>	Reinforced Cement Concrete (Béton Armé)

Introduction générale

De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à la surveillance des structures et à la détection des fissures. Certaines études ont exploité l'analyse vibratoire pour identifier les défauts, d'autres ont développé des modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis afin de simuler le comportement des structures endommagées. Par ailleurs, l'utilisation de matériaux avancés, tels que les matériaux fonctionnellement gradués, a été explorée pour renforcer la résistance des ouvrages face aux séismes [1].

Toutefois, la plupart de ces approches restent théoriques ou nécessitent des équipements onéreux, ce qui limite leur déploiement à grande échelle, particulièrement dans les pays en développement. La protection des infrastructures contre les risques naturels, et en particulier contre les séismes, constitue aujourd'hui un défi majeur pour les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine du génie civil. Les structures, qu'il s'agisse de bâtiments, de ponts ou d'ouvrages industriels, sont soumises à des sollicitations dynamiques complexes qui peuvent entraîner des dégradations progressives, telles que l'apparition et la propagation de fissures [2].

Ces fissures, souvent invisibles à l'œil nu dans leurs premiers stades, réduisent progressivement la rigidité, la capacité portante et la durée de vie des ouvrages. Elles constituent donc un indicateur clé de la santé structurale et nécessitent une surveillance rigoureuse pour éviter des conséquences dramatiques, comme l'effondrement total de l'infrastructure. La compréhension du comportement dynamique des structures endommagées est essentielle pour anticiper leur réponse aux charges sismiques. En effet, la présence de fissures modifie les propriétés vibratoires des matériaux, notamment les fréquences naturelles, le coefficient d'amortissement et la répartition des contraintes internes. Ces modifications, si elles sont correctement mesurées et interprétées, peuvent servir de base pour la détection précoce des défauts et l'évaluation de l'état de santé des bâtiments. Dans ce contexte, les modèles de fondation élastique, tels que les modèles de Winkler, de Pasternak ou encore le modèle viscoélastique, jouent un rôle fondamental dans l'analyse de l'interaction sol-structure et dans l'amélioration de la réponse dynamique des bâtiments face aux séismes. C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet de master. En complément des approches existantes, notre travail vise à concevoir et réaliser un prototype de système intelligent, accessible et à bas coût, pour la détection sismique et la surveillance des fissures [3].

Ce système se distingue par l'utilisation de capteurs MEMS à faible coût (ADXL345, SW420, DHT11, BF350-3AA) et d'une carte Arduino Mega 2560 comme unité de traitement centrale, associée à un circuit imprimé personnalisé conçu sous Proteus. Notre approche

combine à la fois une étude théorique du comportement dynamique des structures et une validation expérimentale sur des éprouvettes en béton armé réalisées au laboratoire. Le système assure également une transmission autonome des alertes via le réseau GSM, garantissant une réaction rapide même en l'absence de connexion Internet.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré à l'analyse du comportement dynamique des structures sous sollicitations sismiques. Il aborde la vulnérabilité des bâtiments face aux séismes, les mécanismes de formation et de propagation des fissures, ainsi que les modèles mathématiques utilisés pour représenter l'effet de ces défauts sur les propriétés mécaniques et vibratoires. Ce chapitre présente également les différentes pathologies des structures, notamment les fissures internes et externes, simples et multiples, verticales et inclinées, ainsi que les modèles de réduction de rigidité. Le deuxième chapitre est dédié aux technologies de détection et de surveillance.

Il présente une revue des capteurs sismiques (accéléromètres), des capteurs de fissures (jauges de déformation, capteurs à fibre optique, capteurs ultrasoniques), et des systèmes d'acquisition de données. Il aborde également les réseaux de communication, qu'ils soient filaires ou sans fil (Wi-Fi, ZigBee, LoRa, GSM), et souligne l'importance des tendances émergentes comme les capteurs auto-alimentés, la fusion de données multimodales et l'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'analyse des signaux. Enfin, le troisième chapitre décrit la phase expérimentale et la réalisation concrète du prototype. Il détaille les étapes de fabrication des éprouvettes en béton armé, depuis le dosage et le malaxage jusqu'au coulage et au cure. Il présente également la conception et la réalisation d'un circuit imprimé personnalisé à l'aide du logiciel Proteus, ainsi que le choix des composants électroniques (Arduino Mega 2560, ADXL345, SW420, DHT11, SIM800L, etc.).

Les tests effectués sur le système sont ensuite décrits, avec une analyse des résultats obtenus. À travers cette structure, ce mémoire vise à apporter une contribution à la fois théorique et pratique dans le domaine de la surveillance des structures, en proposant un outil accessible, fiable et adapté aux besoins des pays sujets aux risques sismiques.

Chapitre I :
Analyse du comportement
dynamique des structures sous
sollicitations sismiques et surveillance
intelligente des fissures

Chapitre I : Analyse du comportement dynamique des structures sous sollicitations sismiques et surveillance intelligente des fissures

I.1 Introduction

Ce chapitre s'inscrit dans le cadre du développement d'un système intelligent de détection sismique et de surveillance des fissures, visant à améliorer la sécurité et la durabilité des structures civiles et industrielles. En effet, les ouvrages en génie civil, notamment en zones sismiques, sont exposés à des sollicitations dynamiques complexes pouvant entraîner l'apparition progressive de défauts structuraux tels que les fissures et les porosités, compromettant ainsi leur intégrité et leur performance globale. Dans cette optique, une analyse approfondie du comportement dynamique des structures est indispensable afin de comprendre les mécanismes d'endommagement et leur influence sur les propriétés mécaniques et vibratoires. Une attention particulière est portée à la formation et à la propagation des fissures, ainsi qu'à leur impact sur la rigidité, l'amortissement et les fréquences naturelles des structures. Par ailleurs, l'étude de l'interaction sol-structure et des matériaux avancés, notamment les matériaux fonctionnellement gradués, permet d'enrichir la compréhension globale du comportement structural. En complément, ce chapitre présente les différentes stratégies de protection des structures, incluant les fondations élastiques, les matériaux innovants et les méthodes numériques avancées. Enfin, il met en évidence l'intérêt de l'intégration de systèmes intelligents de surveillance de santé structurale, basés sur l'utilisation de capteurs, de systèmes d'acquisition de données et d'outils d'intelligence artificielle, constituant ainsi le fondement du système proposé dans ce travail.

I.2 Problèmes des structures en zone sismique

I.2.1 Vulnérabilité des structures aux forces sismiques

Les structures situées dans les zones sismiques sont soumises à des chargements dynamiques complexes qui peuvent provoquer des dégradations significatives. Les séismes génèrent des ondes de propagation qui traversent les structures et affectent leur comportement dynamique "L'analyse de la réponse dynamique à la propagation des ondes dans les poutres" est essentielle pour comprendre le comportement des structures sous sollicitations sismiques [1].



Figure I-1 Dommages structurels causés par un séisme

I.2.2 Formation et propagation des fissures sous forces sismiques

L'activité sismique est l'une des causes majeures de l'apparition et de la propagation des fissures dans les structures. Dans les structures, l'apparition de fissures peut vraiment poser problème, car elles risquent d'entraîner des défaillances importantes. Non seulement elles réduisent la capacité portante, mais elles menacent aussi l'intégrité globale du bâtiment. Ces fissures apparaissent souvent à cause de plusieurs facteurs : par exemple, une activité sismique, des matériaux de faible qualité, ou encore des charges extérieures trop élevées [2].

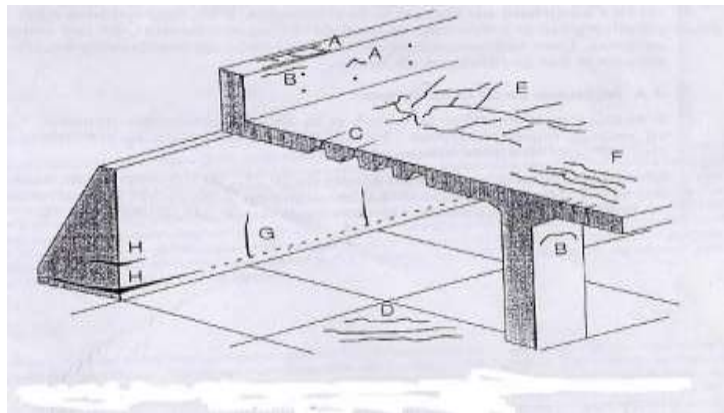


Figure I-2 Initiation des microfissures dans les zones de concentration de contraintes

I.2.3 Effets des fissures sur le comportement dynamique

La présence de fissures modifie fondamentalement les propriétés dynamiques des structures. Quand des fissures apparaissent, la sécurité du fonctionnement de la structure est vraiment menacée. En fait, ces fissures changent pas mal de choses : elles modifient la rigidité, l'amortissement, et aussi le comportement vibratoire de la structure. Du coup, on peut mesurer ces changements et s'en servir pour détecter les fissures, voire même estimer leur importance [3].

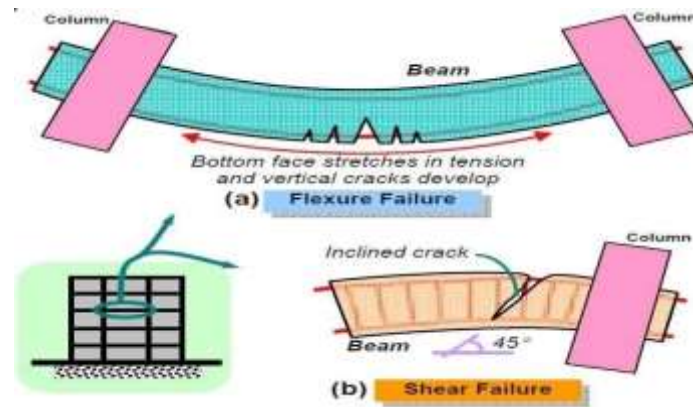


Figure I-3 Réduction de la rigidité due à la présence de fissures

I.2.4 Interaction sol-structure en zone sismique

Les fondations élastiques jouent un rôle crucial dans la réponse des structures aux charges sismiques. La fondation élastique, c'est un sujet assez important en génie civil, surtout quand on étudie les poutres reposant sur un sol flexible. Pour qu'un projet de construction avec ce type de fondation soit à la fois sûr et rentable, il faut vraiment disposer de modèles de fondation précis et de techniques d'analyse efficaces [2].

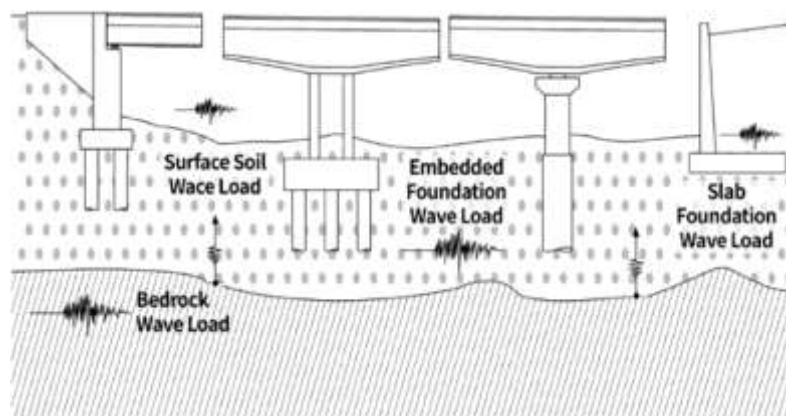


Figure I-4 Transmission des ondes sismiques du sol vers la structure

I.3 Pathologies des structures

I.3.1 Types de fissures et leurs caractéristiques

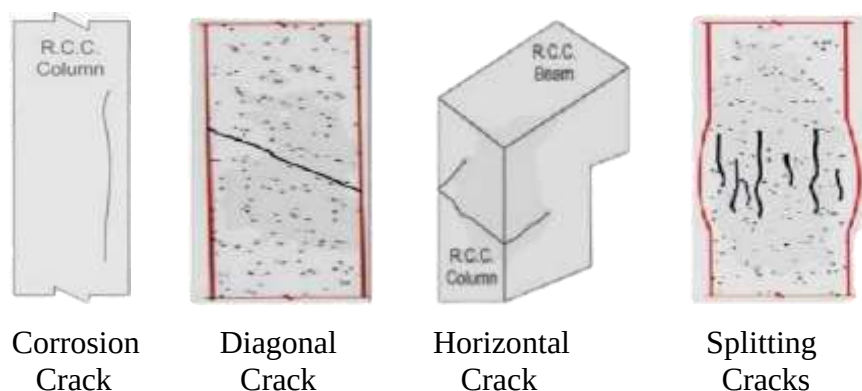


Figure I-5 Différents types de fissures observées dans les structures en béton armé

Les fissures peuvent être classées selon plusieurs critères :

Fissures internes vs externes

Fissures internes

Ce sont des fissures qui se développent à l'intérieur du matériau, sans atteindre la surface extérieure. Elles sont particulièrement dangereuses car difficilement détectables à l'œil nu [3]. Elles peuvent résulter de défauts de fabrication, de contraintes thermiques ou de fatigue interne. Leur effet sur la rigidité de la structure dépend de leur position dans l'épaisseur du matériau [2].

Fissures externes (traversantes)

Ce sont des fissures qui atteignent la surface de la structure, visibles à l'œil nu ou par inspection visuelle. Elles peuvent traverser partiellement ou totalement la section de l'élément structural. Elles sont souvent causées par des surcharges, des chocs ou des cycles de chargement répétés [4].

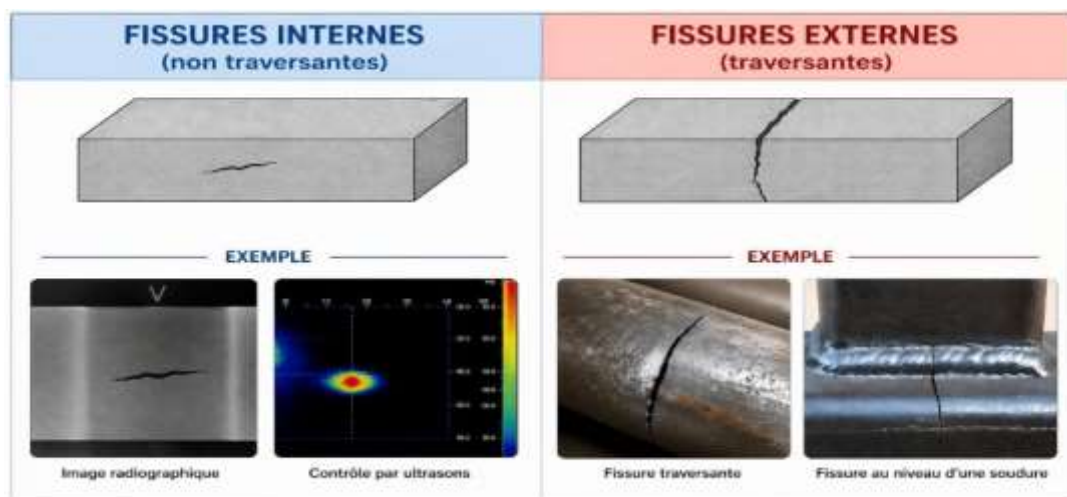


Figure I-6 Fissures internes vs fissures externes

Fissures simples vs multiples

Fissures simples

Il s'agit de la présence d'une seule fissure dans la structure. Ce cas est plus simple à analyser car l'effet sur le comportement dynamique (fréquences, modes de vibration) est directement lié à la position, la profondeur et l'orientation de cette fissure unique [5].

Fissures multiples

La présence de plusieurs fissures dans une même structure complique significativement son comportement mécanique. Les interactions entre les fissures peuvent amplifier les effets de réduction de rigidité [1]. La position relative des fissures entre elles devient un paramètre

critique : des fissures proches peuvent créer des zones de concentration de contraintes plus importantes que la simple somme des effets individuels [2].

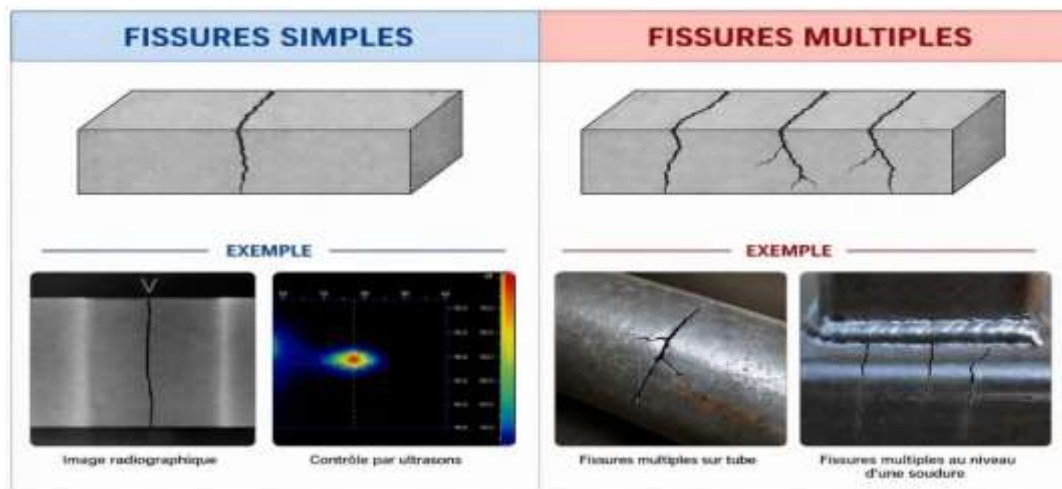


Figure I-7 Fissures simples vs fissures multiples

Fissures verticales vs inclinées

Fissures verticales

Ce sont des fissures orientées perpendiculairement à l'axe longitudinal de la poutre. Elles ont un effet maximal sur la réduction de la rigidité en flexion, car elles coupent directement les fibres tendues ou comprimées.

Ce type de fissure est le plus étudié dans la littérature classique [6].

Fissures inclinées

Ce sont des fissures dont l'orientation forme un angle α par rapport à la verticale. L'effet d'une fissure inclinée sur la rigidité dépend de cet angle : plus l'angle est grand, moins la fissure affecte les fréquences naturelles.

Une fissure inclinée sollicite la structure en cisaillement et en flexion de manière combinée, ce qui modifie son comportement vibratoire par rapport à une fissure verticale [5].

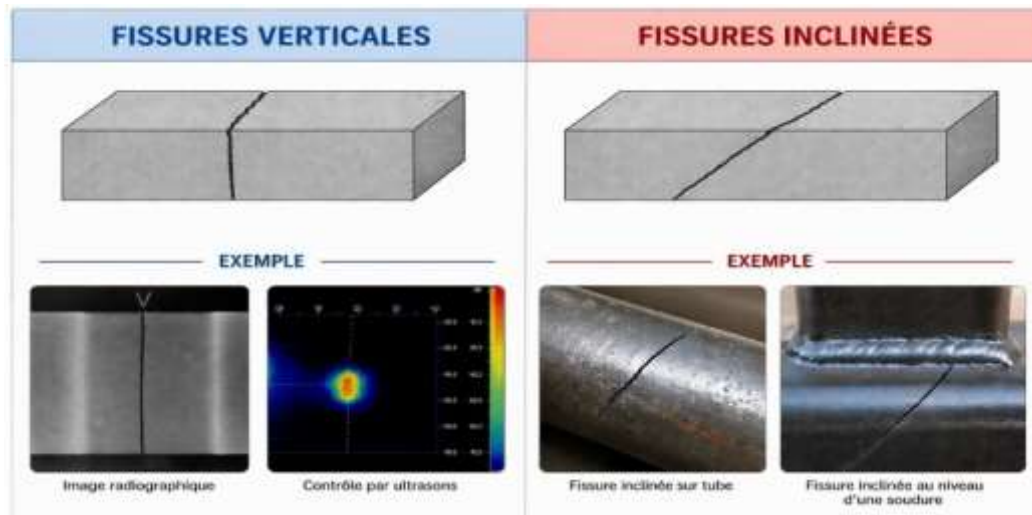


Figure I-8 Fissures verticales vs fissures inclinées

I.3.2 Modélisation des fissures

Approches de modélisation

Les techniques qu'on utilise pour modéliser théoriquement les fissures ne sont pas toutes pareilles : certaines sont plus complexes que d'autres, et toutes ne s'appliquent pas dans les mêmes cas. D'une manière générale, on distingue deux grandes catégories : les micro-modèles et les macro-modèles.

Les micro-modèles, qu'on appelle aussi modèles à rigidité continue, consistent à calculer la rigidité équivalente en flexion au niveau des fissures. Pour ça, on utilise la mécanique de la rupture et des méthodes basées sur l'énergie.

Les macro-modèles, ou modèles à flexibilité localisée, eux, ils simplifient la structure en la découpant en segments reliés par des ressorts de rotation. L'avantage, c'est qu'on a besoin de moins d'éléments pour obtenir des résultats quand même précis [2].

Modélisation par réduction de section

La méthode la plus courante dans les documents analysés est la modélisation par réduction de section : Quand on a une réduction de rigidité dans une poutre en matériau fonctionnellement gradué (FG), ça veut dire en fait que la section transversale de la poutre diminue à cause de la profondeur de la fissure qui se développe. Et ça, c'est valable pour une fissure inclinée d'un angle α [5].

$$B_{11} = c \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-h/2}^{h/2} E(y, z) z^2 dy dz \cos \alpha$$

$E(y, z)$: c'est le module de Young. Il varie selon la position (y et z) dans la section, typique des matériaux fonctionnellement gradués (FGM).

B_{11} : c'est la rigidité en flexion de la poutre.

L'intégrale $\iint E(y, z)z^2 dydz$: représente la rigidité de flexion autour de l'axe $y \cos \alpha$: il corrige cette rigidité selon l'inclinaison de la fissure (angle α).

Modèles de fissures internes

Deux modèles originaux de fissures internes sont proposés [2] :

- Asymétrique
- Symétrique

I.3.3 Effets des fissures sur les fréquences naturelles

- Plus la fissure est profonde, plus les fréquences diminuent [4] ;
- La position de la fissure est critique : Les fissures au milieu de la poutre ont l'impact le plus important [6] ;
- Les modes supérieurs sont plus sensibles à certains types de fissures [1].

I.3.4 Pathologie des matériaux composites et FGM

Porosité comme défaut

D'après certaines études, quand il y a des pores ou des cavités qui se forment pendant la fabrication, ça affecte négativement l'intégrité de la structure et le comportement du matériau.

Trois modèles de distribution de porosité sont étudiés [1] :

Modèle 1 : Distribution uniforme

Modèle 2 : Distribution non-uniforme en forme de "X"

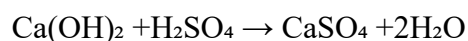
Modèle 3 : Distribution non-uniforme en forme de "O"

Dégradation des bétons spéciaux

Pathologies spécifiques

-Béton caoutchouté [7] : L'ajout de granulats de caoutchouc augmente la porosité et réduit la résistance mécanique.

-Attaque acide [8] : La réaction



entraîne une dégradation chimique du béton.

I.4 Différentes méthodes de protection des structures

I.4.1 Fondations élastiques

Les fondations élastiques constituent une méthode efficace pour protéger les structures et améliorer leur réponse dynamique.

Modèle de Winkler

Le premier modèle, qu'on appelle souvent le modèle de Winkler, est le plus simple parce qu'il considère les fondations comme une série de ressorts indépendants, sans aucune interaction entre eux.

Paramètre adimensionnel [4].

$$\bar{K}\omega = \frac{K\omega L^2}{E_m h}$$

$\bar{K}\omega$: Coefficient de fondation adimensionnel de Winkler.

L : Longueur de la poutre.

E_m : Module de Young du matériau de la poutre.

h : Hauteur de la section de la poutre.

$K\omega$: Coefficient de fondation de Winkler.

Modèle de Pasternak

Pasternak a amélioré le modèle de Winkler en ajoutant un ressort de cisaillement qui imitait la connexion entre différents ressorts. Paramètre adimensionnel [2].

$$Kp = \frac{KL^2}{EI}$$

K : Rigidité du ressort de fondation

L : Longueur de la poutre

E : Module de Young de la poutre

I : Moment d'inertie de la section

Modèle de Winkler-Pasternak combiné

Le modèle de Pasternak-Winkler, c'est un modèle élastique à deux paramètres. Il se compose d'un ressort indépendant en haut, avec une rigidité k_w (c'est le modèle de Winkler classique), et d'un paramètre de couche de cisaillement avec une rigidité k_p qui représente en fait l'interaction entre les différentes parties du ressort à cause de l'effet de cisaillement [2].

Modèle viscoélastique à trois paramètres

Le modèle visco-Pasternak, c'est le modèle de Pasternak classique auquel on a ajouté un effet d'amortissement. Du coup, il est composé du module linéaire de Winkler et du module de cisaillement de Pasternak.

La réaction de la fondation est donnée par [3]

$$R_c = K\omega - Kp \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + Cd \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

R_c : Réaction du sol

K_w : Rigidité du ressort de Winkler

K_p : Rigidité de cisaillement de Pasternak

C_d : Coefficient d'amortissement visqueux

I.4.2 Matériaux avancés pour la protection

Matériaux fonctionnellement gradués (FGM)

Les FGM offrent une meilleure résistance aux endommagements "Pour résoudre ces problèmes, de nouveaux matériaux ont été créés, notamment les matériaux fonctionnellement gradués, qui offrent des performances mécaniques améliorées et une meilleure résistance aux endommagements" [1].

Avantages des FGM [1] :

- Transition graduelle des propriétés réduisant les concentrations de contraintes ;
- Résistance aux températures élevées (phase céramique) ;
- Résistance à la rupture (phase métallique).

Bétons écologiques

Deux types de bétons écologiques sont proposés :

- Béton caoutchouté : Incorporation de déchets de pneus pour améliorer l'isolation acoustique et la ductilité [7].

- Béton avec vase calcinée : Valorisation des sédiments de dragage comme substitut partiel du ciment (jusqu'à 30%) [8].

I.4.3 Poutres composites

Les poutres composites acier-béton polymère à section caisson combinent les propriétés synergiques de l'acier et du béton polymère pour obtenir des performances mécaniques améliorées, notamment [6] :

- Rigidité accrue.
- Dissipation d'énergie vibratoire.
- Adaptabilité dynamique.

I.4.4 Méthodes numériques pour l'analyse et la protection

Plusieurs méthodes numériques avancées sont utilisées pour analyser et prédire le comportement des structures

1-Méthode : FEM (h-FEM) [4].

Application : Discrétisation des équations, analyse vibratoire

2- Méthode : DQFEM [6].

Application : Haute précision, convergence rapide

3- Méthode : HSDT / Quasi-3D [9].

Application : Modélisation précise des déformations de cisaillement

4- Méthode : ANSYS Workbench [8].

Application : Simulation numérique par éléments finis

I.5 Utilisation de systèmes intelligents dans les structures civiles et industrielles

I.5.1 Surveillance de santé structurale (SHM)

Ils fournissent les bases pour le développement de systèmes intelligents de surveillance.

Détection des fissures par analyse vibratoire

Les variations des fréquences naturelles peuvent être utilisées pour détecter et quantifier les fissures "Les propriétés de rigidité, d'amortissement et vibrationnelles d'une structure sont toutes affectées par la présence de fissures, ce qui peut être mesuré et utilisé pour identifier et quantifier les fissures." [3].

Propagation d'ondes comme outil de diagnostic

L'analyse de la propagation des ondes dans les structures permet de : Détecter les défauts internes Évaluer l'état de santé des matériaux Localiser les fissures et les zones endommagées [1].

I.5.2 Capteurs et instrumentation

- Capteurs ultrasonores : Mesure de la vitesse de propagation des ondes (UPV) pour évaluer la qualité du béton [7].

-Analyse au microscope électronique (SEM) : Observation de la microstructure et des mécanismes de dégradation [8].

- Essais non-destructifs (NDT) : Corrélation entre les mesures non-destructives et les propriétés mécaniques [7].

I.5.3 Modélisation numérique comme "jumeau numérique"

Les modèles éléments finis développés peuvent servir de base à des jumeaux numériques pour :

- Prédire le comportement des structures en temps réel.
- Simuler l'effet des fissures et des défauts.

- Optimiser la maintenance préventive [8].

I.5.4 Intelligence artificielle et apprentissage automatique

Des travaux récents qui utilisent l'apprentissage automatique ont permis résoudre plusieurs problèmes en mécanique classique. Par exemple, des chercheurs ont proposé une méthode énergétique basée sur un auto encodeur profond combiné avec de l'apprentissage par transfert pour analyser la flexion, les vibrations et le flambage des plaques de Kirchhoff [9].

I.6 Objectifs

I.6.1 Objectif général

L'objectif général de ce travail est d'analyser le comportement dynamique des structures en matériaux avancés, notamment leurs vibrations, leurs fréquences naturelles et la propagation des ondes mécaniques, en présence de défauts structurels (fissures, porosités) et sous différentes conditions de chargement (mécanique, thermique, environnemental). Cette analyse vise à mieux comprendre les mécanismes d'endommagement et à contribuer au développement de systèmes de surveillance et de protection adaptés.

I.6.2 Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre cet objectif général, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis :
Étudier l'influence des fissures :

Sur le comportement dynamique des structures en considérant différents paramètres tels que la profondeur, la position, l'inclinaison et le nombre de fissures.

Analyser l'effet des porosités :

Et de leur distribution (uniforme ou non uniforme) sur la propagation des ondes et la rigidité des matériaux.

Évaluer le rôle des fondations élastiques :

(Modèles de Winkler, Pasternak et viscoélastique) dans l'amélioration de la réponse dynamique des structures endommagées.

Examiner l'impact des conditions environnementales :

Notamment les variations thermiques (linéaires et non linéaires) et les attaques chimiques (acides), sur la durabilité et le comportement vibratoire des structures.

Développer et valider des modèles théoriques et numériques :

(Théorie des poutres, éléments finis, méthodes de quadrature différentielle) capables de prédire avec précision la réponse des structures en présence de défauts.

Caractériser expérimentalement de nouveaux matériaux (validation expérimentale de notre étude)

À base de déchets recyclés (caoutchouc de pneus, sédiments de dragage) pour évaluer leur potentiel dans des applications structurelles durables.

-Proposer des outils d'aide à la décision :

Pour la maintenance et la surveillance des structures, en exploitant les relations entre les paramètres de défauts et les indicateurs dynamiques mesurables.

I.6.3 Objectif appliqué

En complément de ces objectifs théoriques et numériques, ce travail vise également un objectif appliqué : contribuer au développement de systèmes intelligents de surveillance de santé structurale capables de détecter en temps réel l'apparition et l'évolution des défauts, afin d'assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages civils et industriels.

I.7 Problématique

I.7.1 Problématique générale

La préservation et la surveillance des structures civiles et industrielles face aux risques naturels et aux dégradations progressives constituent un défi majeur pour le génie civil moderne. Les structures sont soumises à des sollicitations complexes (chargements sismiques, variations thermiques, agressions chimiques) qui peuvent entraîner l'apparition et la propagation de défauts structurels tels que les fissures et les porosités. Ces défauts modifient fondamentalement le comportement dynamique des ouvrages, affectant leur rigidité, leurs fréquences naturelles et leur capacité à dissiper l'énergie. Face à ce constat, une question centrale se pose : Comment les défauts structurels (fissures, porosités) et les conditions environnementales (chargements dynamiques, température, attaques chimiques) influencent-ils le comportement dynamique des structures en matériaux avancés, et comment peut-on modéliser précisément ces effets pour améliorer la conception, la protection et la maintenance des ouvrages ?

I.8 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en évidence l'influence significative des sollicitations sismiques et des défauts structurels, notamment les fissures et les porosités, sur le comportement dynamique des structures. L'analyse des différents types de fissures, de leurs caractéristiques et de leurs effets sur les propriétés mécaniques et vibratoires a permis de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement affectant les ouvrages. Les approches de modélisation et les méthodes numériques présentées constituent des outils essentiels pour la simulation et la prédiction du comportement des structures endommagées. De plus, les stratégies de protection étudiées, telles que l'utilisation de fondations élastiques et de matériaux

avancés, offrent des solutions pertinentes pour améliorer la résistance et la durabilité des structures face aux sollicitations externes. Dans ce contexte, l'intégration des systèmes intelligents de surveillance de santé structurale apparaît comme une solution prometteuse pour répondre aux enjeux actuels du génie civil. Le recours à des capteurs, à des systèmes d'acquisition de données et à des algorithmes de traitement des données permet d'assurer une détection précoce et fiable des anomalies

Chapitre II :

Technologies de détection sismique et de surveillance des fissures

Chapitre II : Technologies de détection sismique et de surveillance des fissures

II.1 Introduction

La surveillance de santé structurale (Structural Health Monitoring, SHM) repose sur des réseaux de capteurs permettant d'évaluer en temps réel l'intégrité des ouvrages d'art (ponts, tunnels, bâtiments de grande hauteur) en collectant des données sur les vibrations, déformations, contraintes et autres paramètres clés.

Ce chapitre présente les principales technologies de détection utilisées pour la surveillance sismique et des fissures.

II.2 Capteurs sismiques

Les capteurs sismiques sont essentiels pour détecter les mouvements du sol et les vibrations des structures. Deux types principaux sont utilisés.

II.2.1 Accéléromètres

Les accéléromètres mesurent l'accélération d'une structure ou du sol. Ils sont largement utilisés en SHM pour capturer les réponses dynamiques des structures sous charges sismiques ou environnementales. Associés à d'autres capteurs comme les inclinomètres, ils permettent une estimation précise des déplacements latéraux des structures de grande hauteur sous charge de vent [10].

Les accéléromètres modernes intègrent des technologies MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) offrant une haute précision, faible coût et facilité d'intégration. Ils peuvent être déployés en réseaux sans fil pour une surveillance distribuée [11].



Figure II-1 Accéléromètre numérique ADXL345

II.2.2 Géophones

Les géophones sont des capteurs de vitesse spécialisés dans la mesure des vibrations du sol. Contrairement aux accéléromètres, ils sont optimisés pour les basses fréquences et offrent

une sensibilité supérieure pour la détection des ondes sismiques. Ils sont couramment utilisés en exploration géophysique et pour la surveillance sismique des infrastructures critiques. Leur principe de fonctionnement repose sur une masse suspendue par un ressort dans un champ magnétique : le mouvement de la masse induit une tension proportionnelle à la vitesse.



Figure II-2 Capteur sismique Géophone

II.3 Capteurs de fissures

II.3.1 Jauges de déformation

Les jauges de déformation (strain gauges) mesurent les déformations locales à la surface des structures. Ce sont des capteurs résistifs : la variation de résistance électrique est proportionnelle à la déformation mécanique. Elles sont utilisées pour surveiller l'ouverture des fissures et les concentrations de contraintes.

Cependant, les capteurs conventionnels souffrent d'une précision de mesure parfois insuffisante [12]. Des capteurs innovants ont été développés pour pallier ces limitations, comme les capteurs à fibre optique ou les jauges à fil vibrant (vibrating wire strain gauges) [11].

II.3.2 Capteurs à fibre optique

La technologie des fibres optiques est l'une des plus prometteuses pour la surveillance des fissures. Les capteurs à fibre optique (Fiber Optic Sensors, FOS) offrent de nombreux avantages par rapport aux capteurs conventionnels [13] :

- ❖ Légèreté et petite taille ;
- ❖ Immunité aux perturbations électromagnétiques ;
- ❖ Faible consommation d'énergie ;
- ❖ Haute sensibilité ;
- ❖ Capacité de multiplexage (un seul câble peut contenir plusieurs capteurs) ;
- ❖ Possibilité de mesures réparties sur de longues distances.

Deux types principaux sont utilisés :

- Capteurs FBG (Fiber Bragg Grating) : Mesures locales ponctuelles avec haute précision ;

- Capteurs distribués (BOTDR, OFDR) : Mesures continues le long de la fibre, permettant une surveillance étendue [13].

Ces capteurs sont particulièrement adaptés pour détecter les microfissures avant même qu'elles ne deviennent visibles en surface [10].



Figure II-3 Capteur à fibre optique

II.3.3 Capteurs ultrasoniques

Les capteurs ultrasoniques utilisent la propagation d'ondes guidées (Lamb waves) pour détecter les défauts internes. Cette technique, appelée Guided Wave Structural Health Monitoring (GWSHM), repose sur l'analyse des modifications des signaux ultrasonores lorsqu'ils interagissent avec une fissure ou un défaut.

Les avancées récentes incluent des techniques "Baseline-free" (sans référence préalable) comme le retournement temporel (Time Reversal) et la réciprocité, permettant de détecter des dommages sans nécessiter de mesures de référence de l'état sain. Ces méthodes sont particulièrement utiles lorsque l'état initial de la structure n'est pas connu [14].



Figure II-4 Capteur ultrasonique

Malgré leurs excellentes performances, ces technologies n'ont pas été retenues en raison de leur coût élevé et de leur complexité d'intégration dans un prototype pédagogique.

II.4 Systèmes d'acquisition de données

Les systèmes d'acquisition de données (Data Acquisition Systems, DAQ) sont le lien entre les capteurs et l'analyse. Ils assurent la conversion analogique-numérique, le conditionnement des signaux, et le stockage temporaire.

Éléments clés d'un système DAQ moderne

Conditionnement de signal : Amplification, filtrage, isolation.

Conversion A/N : Résolution (12-24 bits), fréquence d'échantillonnage.

Stockage local : Mémoire tampon pour les données avant transmission.

Synchronisation temporelle : Essentielle pour l'analyse modale et la localisation de dommages.

Les systèmes DAQ sans fil intègrent directement des modules de communication pour transmettre les données aux centres de traitement [12].

II.5 Communication des données

II.5.1 Communication par réseaux filaire

Avantages

- Fiabilité élevée.
- Immunité aux interférences.
- Bande passante élevée.
- Alimentation intégrée.

Inconvénients

- Installation complexe et coûteuse ;
- Sensibilité aux dégradations (corrosion, coupures) ;
- Difficulté d'accès pour la maintenance.



Figure II-5 Communication par réseaux filaire

II.5.2 Communication par réseaux sans fil (WSN - Wireless Sensor Networks)

Les réseaux de capteurs sans fil sont devenus un axe de recherche majeur en SHM. Ils éliminent les câbles, réduisent les coûts d'installation et permettent un déploiement sur des zones étendues ou difficiles d'accès [12].



Figure II-6 Communication par réseaux sans fil

Les principales technologies sans fil utilisées en SHM [15]

Les réseaux sans fil intègrent cinq composants : capteurs, mémoire, communication sans fil, processeur central et convertisseur A/N [12].

Les principales technologies de communication sans fil utilisées dans les systèmes de surveillance de l'intégrité structurelle (SHM) sont présentées dans le tableau II-1. Chaque technologie se distingue par sa portée, son débit de transmission, sa consommation énergétique et son domaine d'application.

Tableau II-1 Les principales technologies sans fil utilisées en SHM

Technologie	Portée	Débit	Consommation	Applications typiques
Wi-Fi	50-100 m	Élevé (mbps)	Elevée	Réseaux denses, forte volumétrie
ZigBee	10-100 m	Modéré (250 kbps)	Très faible	Capteurs à basse consommation, MeSH
Bluetooth \BLE	10-50 m	Modéré	Très faible	Proximité, wearables
LoRa	2-5 km (urbain), 15 km (rural)	Très faible (kbps)	Très faible	Longue portée, faible débit
NB-IoT	Couverture cellulaire	Faible	Faible	IoT cellulaire, infrastructures
4G/5G	Couverture étendue	Très élevé	Élevée	Vidéo, données massives

Le tableau II-1 met en évidence les différences entre les technologies sans fil utilisées en SHM. Le Wi-Fi offre un débit élevé mais consomme davantage d'énergie. ZigBee et Bluetooth Low Energy (BLE) se caractérisent par une faible consommation énergétique, ce qui les rend adaptés aux réseaux de capteurs. LoRa permet une communication sur de longues distances avec une très faible consommation, tandis que le NB-IoT bénéficie de l'infrastructure cellulaire pour assurer une large couverture. Enfin, les technologies 4G/5G offrent des débits très élevés et une couverture étendue, mais au prix d'une consommation énergétique plus importante. Le choix de la technologie dépend donc des exigences de l'application en termes de portée, de débit et d'autonomie énergétique.

Défis des WSN en SHM [12]

- Gestion de l'énergie (durée de vie des batteries) ;
- Synchronisation temporelle ;
- Robustesse aux interférences ;
- Sécurité des transmissions.

II.6 Comparaison des différentes technologies

II.6.1 Tableau comparatif des capteurs

Afin d'identifier la technologie de mesure la plus adaptée à la surveillance de l'intégrité structurale (SHM), une comparaison des principaux capteurs utilisés dans ce domaine est présentée dans le tableau II-2.

Le tableau II-2 présente les caractéristiques, les avantages et les limites des principales technologies de capteurs utilisées en SHM. Les accéléromètres et les géophones sont principalement employés pour la surveillance des vibrations, tandis que les jauges de déformation permettent de mesurer les déformations locales des structures. Les capteurs à fibre optique offrent une grande précision et une immunité aux perturbations électromagnétiques, mais leur coût demeure relativement élevé. Quant aux capteurs ultrasonores, ils sont particulièrement efficaces pour la détection précoce des défauts internes. Le choix du capteur dépend donc des exigences de l'application en matière de précision, de coût, de portée de surveillance et de facilité d'implantation.

Tableau II-2 Comparaison des principaux capteurs utilisés en SHM

Capteur	Principe	Paramètre mesuré	Avantages	Inconvénients
Accéléromètre	Masse sismique, transduction capacitive/ piézoélectrique	Accélération	Large bande, précis, mature	Sensible au bruit, dérive possible
Géophone	Masse-ressort, induction électromagnétique	Vitesse	Excellente sensibilité basse fréquence	Fragile, coût modéré
Jauge de déformation	Résistance électrique	Déformation locale	Faible coût, facile à installer	Dérive, fragile, mesure ponctuelle
Fibre optique (FBG)	Réseau de Bragg	Déformation, température	Immunité EMI, multiplexage, haute précision	Coût élevé, lecture complexe
Fibre optique (distribuée)	Rétrodiffusion Brillouin/Raman	Déformation, température continue	Surveillance étendue (km), haute résolution	Très coûteux, instrumentation lourde
Capteur ultrasonore (PZT)	Onde guidée, effet piézoélectrique	Intégrité, défauts internes	Détection précoce, actif	Nécessite baseline, atténuation

II.6.2 Comparaison des technologies de communication

Afin de sélectionner la technologie de communication la plus adaptée aux systèmes de surveillance structurelle, une comparaison des principales solutions filaires et sans fil est présentée dans le tableau II-3.

Tableau II-3 Comparaison des technologies de communication

Critère	Filaire	Wi-Fi	ZigBee	Lora	4G/5G
Fiabilité	Élevée	Moyenne	Élevée	Élevée	Élevée
Coût installation	Élevé	Faible	Très faible	Très faible	Faible
Consommation	N/A	Élevée	Très faible	Très faible	Moyenne
Portée	Limitée par câble	Courte (50-100 m)	Courte (100 m)	Longue (km)	Couverture cellulaire
Débit	Très élevé	Élevé	Faible	Très faible	Élevé
Maintenance	Complexe	Simple	Simple	Simple	Simple

Le tableau II-3 présente une comparaison entre les différentes technologies de communication utilisées dans les systèmes de surveillance. Les solutions filaires offrent une grande fiabilité et un débit élevé, mais nécessitent une installation et une maintenance plus complexes. Parmi les technologies sans fil, le Wi-Fi se distingue par son débit élevé, tandis que ZigBee et LoRa privilégient une faible consommation énergétique. La technologie LoRa est particulièrement adaptée aux communications longue distance, alors que les réseaux 4G/5G assurent une couverture étendue et des débits importants. Le choix de la technologie dépend ainsi des contraintes de l'application, notamment en termes de portée, de consommation énergétique, de coût et de débit de transmission.

II.7 Tendances émergentes

II.7.1 Capteurs intelligents et auto-alimentés

Les capteurs piézoélectriques et triboélectriques (TENG) permettent la récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes, ouvrant la voie à des capteurs autonomes [11]. Les nano générateurs triboélectriques sont particulièrement prometteurs pour les applications à faible fréquence et faible amplitude [12].



Figure II-7 Capteur intelligent

II.7.2 Fusion de données multimodales

L'intégration de multiples types de capteurs (accéléromètres, jauges, fibres optiques) permet une vision complète de l'état de santé de la structure. Les approches ISAC (Integrated Sensing and Communication) combinent détection et communication pour des réseaux denses sans installations supplémentaires [10].

II.7.3 Intelligence artificielle et deep learning

Le deep learning révolutionne l'analyse des données SHM en permettant [13] :

- Détection automatique de motifs de dommages ;
- Localisation et quantification des défauts ;
- Prédiction de l'évolution des dommages ;
- Précision de prédiction > 97% pour certaines applications.

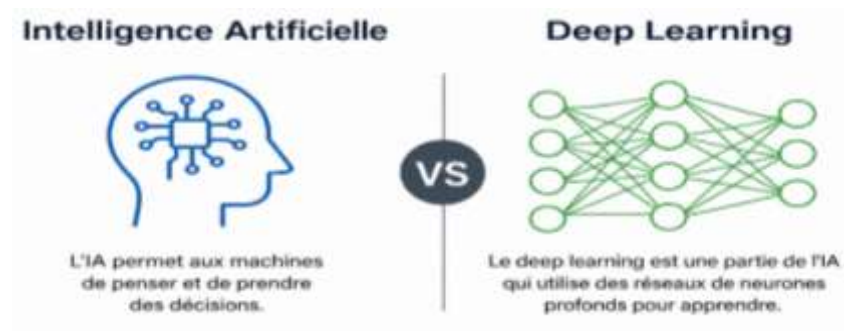


Figure II-8 Comparaison entre l'Intelligence Artificielle et le Deep Learning

II.7.4 Jumeaux numériques

L'intégration des données de capteurs dans des modèles BIM (Building Information Modeling) permet la création de jumeaux numériques pour la visualisation temps réel et l'aide à la décision [16].



Figure II-9 Principe de fonctionnement d'un jumeau numérique

II.8 Architecture globale du système

II.8.1 Architecture en trois couches

Les systèmes modernes de surveillance de santé structurale (SHM) adoptent généralement une architecture en trois couches distinctes [12] :

Tableau II-4 Architecture en trois couches

Couche	Composants	Fonction
Couche perception	Capteurs (accélération, humidité, vibration)	Mesure des grandeurs physiques et conversion en signaux électriques
Couche réseau	Module GSM/4G, Wi-Fi, ZigBee	Transmission des données vers le centre de traitement
Couche application	Téléphone, serveur cloud, interface utilisateur	Réception des alertes, visualisation et analyse

Cette architecture permet une séparation claire des fonctions et facilite la maintenance et l'évolution du système [12].

II.8.2 Flux de données

Le flux de données de notre système suit un cheminement séquentiel et optimisé pour garantir une alerte rapide et fiable. Dans un premier temps, les signaux physiques captés subissent un conditionnement et une conversion analogique-numérique (A/N) afin d'être exploitables. Ensuite, le microcontrôleur prend en charge le stockage local des données pour l'historique, tout en effectuant un traitement et une analyse algorithmique en temps réel. Enfin, si l'analyse révèle un dépassement de seuil critique mémorisé, le système valide l'anomalie et déclenche instantanément l'envoi d'une alerte via le réseau mobile (SMS/4G) vers le téléphone de l'utilisateur ou une plateforme Cloud.

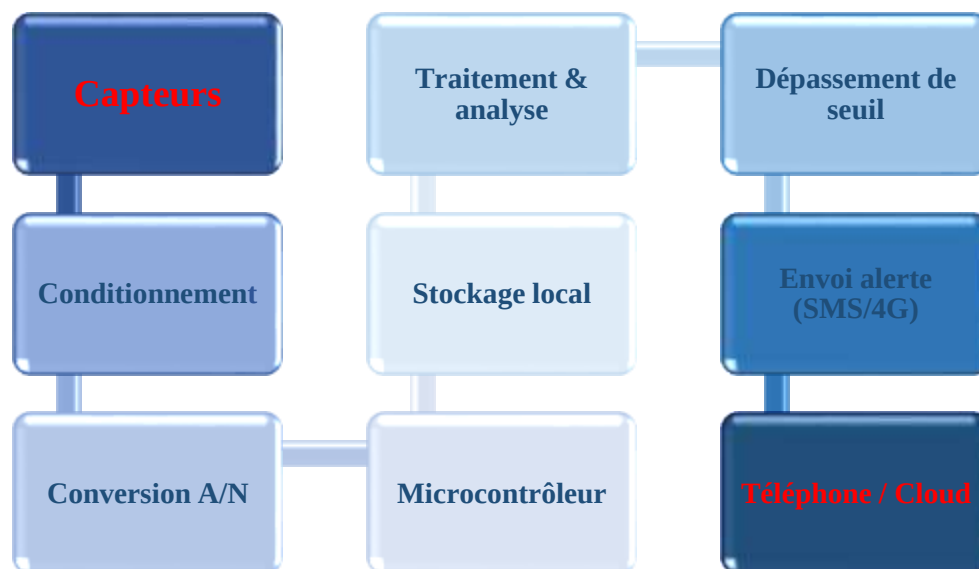


Figure II-10 Flux de données

II.8.3 Schéma fonctionnel général du système

Ce schéma illustre l'architecture fonctionnelle et séquentielle du traitement de l'information au sein de notre prototype. Le processus débute par la collecte simultanée des grandeurs physiques via les différents capteurs intégrés (accélération, vibration, fissure, température et humidité) pour assurer une acquisition de données brutes. Ces dernières subissent ensuite un traitement algorithmique incluant le filtrage, la mise à l'échelle et l'extraction des caractéristiques structurelles. Le système procède alors à une détection des seuils en comparant les valeurs mesurées aux limites critiques prédéfinies. En cas de dépassement, une alarme locale est immédiatement déclenchée, suivie d'une transmission des alertes à distance via le module GSM (SIM800L), permettant ainsi la réception des notifications en temps réel sur le téléphone de l'utilisateur pour une surveillance continue.

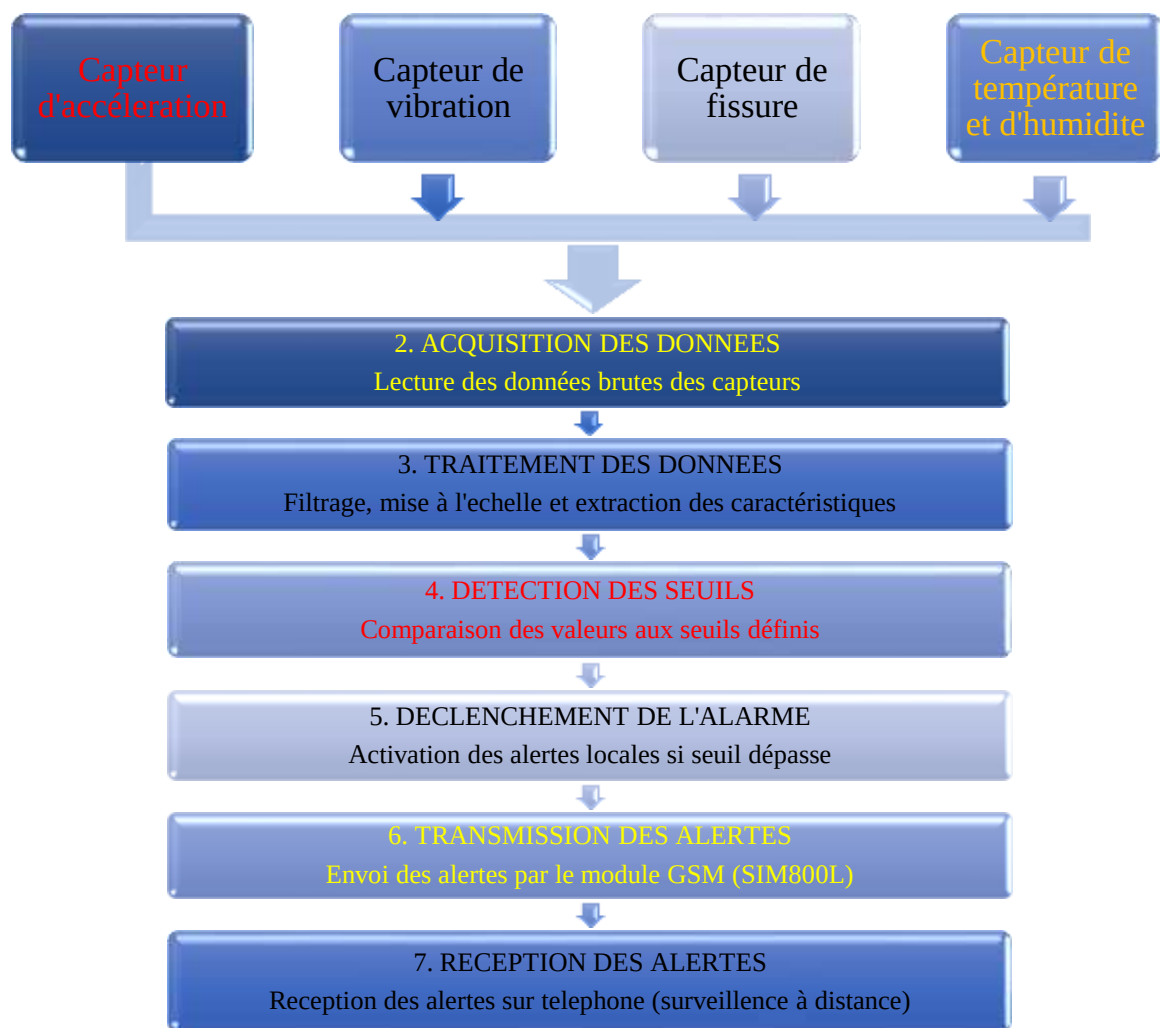


Figure II-11 Schéma fonctionnel général du système

II.9 Choix des capteurs

II.9.1 Capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)

Les capteurs MEMS sont devenus des composants essentiels pour la surveillance de santé structurale en raison de leur miniaturisation, faible consommation d'énergie et haute précision [12]. Ils sont particulièrement adaptés aux applications SHM car ils permettent une installation discrète sur les structures existantes sans modification majeure.

Capteur d'humidité et de température : DHT11

Description technique

Le DHT11 est un capteur numérique de température et d'humidité relative [17]. Il intègre un capteur d'humidités capacitives et un capteur de température NTC (Coefficient de Température Négatif), connectés à un microcontrôleur 8 bits interne qui fournit une sortie numérique calibrée [18].



Figure II-12 Capteur d'humidité et de température DHT11

Caractéristiques techniques principales [17]

Les principales caractéristiques techniques du capteur DHT11 sont présentées dans le tableau II-5. Ce capteur est largement utilisé dans les systèmes embarqués pour la mesure simultanée de la température et de l'humidité grâce à sa simplicité d'intégration et son faible coût.

Tableau II-5 Caractéristiques techniques du capteur

Paramètre	Valeur
Plage de mesure d'humidité	20 % à 90 % RH
Précision humidité	±5 % RH
Plage de température	0 °C à 50 °C
Précision température	±2 °C
Interface	1-wire (bus unifilaire)
Tension d'alimentation	3,3 V à 5,5 V
Consommation	Faible (idéal pour IoT)
Temps d'acquisition	~4 ms

Le tableau II-5 montre que le DHT11 offre une solution économique et facile à mettre en œuvre pour la surveillance des conditions environnementales. Bien que sa précision soit modérée par rapport à des capteurs plus avancés, sa faible consommation énergétique, sa communication numérique via l'interface 1-Wire et sa compatibilité avec les microcontrôleurs en font un choix adapté aux applications de surveillance et d'Internet des Objets (IoT).

Principe de fonctionnement

Le DHT11 utilise une interface de communication série unifilaire (single-bus). Une transmission complète de données (40 bits) comprend :

- 8 bits pour l'humidité (partie entière) ;
- 8 bits pour l'humidité (partie décimale) ;
- 8 bits pour la température (partie entière) ;
- 8 bits pour la température (partie décimale) ;

- 8 bits de checksum (somme de contrôle).

La communication est initiée par le microcontrôleur qui envoie un signal de démarrage, après quoi le DHT11 répond et transmet les données [18].

Capteur de vibration: SW420

Description technique

Le SW420 est un capteur de vibration basé sur un interrupteur à bille (ball switch). Il se compose d'une petite bille métallique à l'intérieur d'un cylindre. Lorsqu'une vibration ou un choc est détecté, la bille se déplace et ferme le circuit électrique, générant un signal numérique [19].



Figure II-13 Capteur de vibration SW420

Caractéristiques techniques principales

Les principales caractéristiques techniques du capteur de vibration SW420 sont présentées dans le tableau II-6. Ce capteur a été sélectionné pour sa simplicité d'utilisation, son faible coût et sa capacité à détecter efficacement les vibrations et les chocs [20].

Tableau II-6 Caractéristiques techniques principales

Paramètre	Valeur
Type	Interrupteur à bille (ball switch)
Sortie	Signal numérique (N/O normalement ouvert)
Tension d'alimentation	3,3 V à 5 V
Sensibilité	Réglable par potentiomètre
Interface	Numérique (GPIO)
Consommation	Très faible (aucun amplificateur actif)

Le tableau II-6 montre que le capteur SW420 dispose d'une sortie numérique facilement exploitable par les microcontrôleurs via une interface GPIO. Sa sensibilité réglable par potentiomètre permet d'adapter le seuil de détection aux besoins de l'application. De plus, sa

faible consommation énergétique et sa simplicité de fonctionnement en font une solution fiable et économique pour la surveillance des vibrations dans les structures.

Principe de fonctionnement

Le principe est mécanique : en l'absence de vibration, la bille métallique repose au fond du capteur, maintenant le circuit ouvert. Lorsqu'une vibration ou un choc dépasse un certain seuil, la bille se déplace et entre en contact avec les bornes électriques, fermant ainsi le circuit. La sortie passe alors à l'état bas (ou haut selon le montage) [19].

Capteur d'accélération : ADXL345

Description technique

L'ADXL345 est un accéléromètre numérique 3 axes haute performance fabriqué par Analog Devices. Il mesure l'accélération statique (gravité) pour les applications de mesure d'inclinaison, ainsi que l'accélération dynamique (mouvement ou choc) [21].



Figure II-14 Capteur d'accélération ADXL345

Caractéristiques techniques principales [21]

Les principales caractéristiques techniques de capteur d'accélération ADXL345 sont présentées dans le tableau II-7. Ce capteur a été retenu pour sa précision, sa faible consommation d'énergie et sa capacité à mesurer les accélérations selon trois axes.

Tableau II-7 Caractéristiques techniques principales

Paramètre	Valeur
Type	Accéléromètre MEMS capacitif 3 axes
Plages de mesure	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g (sélectionnables)
Résolution	Jusqu'à 13 bits (4 mg/LSB)
Tension d'alimentation	2,0 V à 3,6 V
Tension I/O	1,7 V à VS
Consommation (mesure)	23 μ A (typique)
Consommation	0,1 μ A
Interface numérique	I ² C / SPI (3 et 4 fils)
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C
Résistance aux chocs	10 000 g
Dimensions	3 mm $\times$ 5 mm $\times$ 1 mm (boîtier LGA)

Le tableau met en évidence les performances de l'ADXL345 en termes de précision et d'efficacité énergétique. Grâce à ses différentes plages de mesure, sa résolution pouvant atteindre 13 bits et ses interfaces de communication I²C et SPI, ce capteur est particulièrement adapté aux applications de surveillance structurelle. Sa faible consommation électrique et sa résistance élevée aux chocs garantissent également une utilisation fiable dans les systèmes embarqués de détection des vibrations et des mouvements sismiques.

Principe de fonctionnement

L'ADXL345 utilise la technologie MEMS capacitive. Sa haute résolution (4 mg/LSB) permet de mesurer des changements d'inclinaison inférieurs à 1,0°. Les données de sortie sont formatées en complément à deux sur 16 bits et accessibles via I²C ou SPI [22].

Capteur jauge de contrainte : BF350

Description technique

Le BF350 est une jauge de contrainte résistive utilisée pour mesurer les déformations mécaniques des structures. Lorsqu'une contrainte est appliquée sur la surface où elle est fixée, sa résistance électrique varie proportionnellement à la déformation. Associé à un module de conditionnement du signal, il permet la détection et la surveillance des fissures dans les structures de génie civil.



Figure II-15 Capteur jauge de contrainte BF350

Caractéristiques techniques principales

Les principales caractéristiques techniques de la jauge de contrainte BF350 sont présentées dans le tableau II-8.

Le tableau II-8 montre que la jauge BF350 possède une sensibilité élevée et une bonne compatibilité avec les systèmes embarqués. Ces caractéristiques la rendent adaptée à la détection des déformations mécaniques et des fissures dans les structures surveillées.

Tableau II-8 Caractéristiques techniques du BF350

Paramètre	Valeur
Type	Jauge de contrainte résistive
Résistance nominale	350 $\Omega \pm 0,3 \Omega$
Facteur de jauge (Gauge Factor)	$\approx 2,0$
Sensibilité	Élevée
Interface	Analogique (AO) / Numérique (DO)
Tension d'alimentation du module	3,3 V à 5 V
Température de fonctionnement	-20 °C à +80 °C
Application principale	Détection des déformations et fissures

Principe de fonctionnement

Le BF350 fonctionne selon le principe de la variation de résistance électrique sous l'effet d'une déformation mécanique. Lorsqu'une contrainte est appliquée à la structure surveillée, la jauge s'allonge ou se comprime, ce qui entraîne une variation de sa résistance. Cette variation est généralement mesurée à l'aide d'un pont de Wheatstone puis amplifiée par un circuit de conditionnement. Le signal obtenu est ensuite traité par le microcontrôleur afin d'évaluer l'état de la structure et de détecter l'apparition ou l'évolution des fissures.

Fonctionnalités spéciales intégrées [21]

- Détection d'activité/inactivité : Compare l'accélération sur chaque axe avec des seuils définis par l'utilisateur ;
- Détection de tap simple/double : Idéal pour la détection d'impacts ;
- Détection de chute libre (free-fall) : Détecte si l'appareil est en chute ;
- FIFO 32 niveaux : Réduit la charge du microcontrôleur en stockant les données.

Tableau comparatif

Comparaison des capteurs sélectionnés

Afin de justifier le choix des capteurs intégrés dans le système proposé, une comparaison de leurs principales caractéristiques est présentée dans le tableau II-9.

Le tableau II-9 met en évidence la complémentarité des capteurs sélectionnés. Le DHT11 assure la surveillance des conditions environnementales (température et humidité), tandis que le SW420 permet la détection des vibrations. L'ADXL345 offre une mesure précise des accélérations sur trois axes, ce qui le rend particulièrement adapté à la surveillance des

mouvements et des secousses. Enfin, la jauge de contrainte BF350 permet de détecter les déformations mécaniques et l'apparition de fissures. L'association de ces capteurs garantit ainsi une surveillance complète et fiable de l'état de la structure.

Tableau II-9 Comparaison des capteurs sélectionnés

Capteur	Grandeur mesurée	Interface	Précision	Avantages
DHT11	Humidité + température	1-wire	$\pm 5\%$ RH, $\pm 2^\circ\text{C}$	Faible coût, faible consommation, sortie numérique
SW420	Vibration (seuil)	Numérique (GPIO)	Seuil réglable	Très faible coût, consommation quasi nulle, robuste
ADXL345	Accélération 3 axes	I ² C ou SPI	13 bits (4 mg/LSB) jusqu'à ± 16 g	Haute résolution, mesure 3 axes, très faible consommation, fonctions intégrées
BF350	Déformation mécanique (fissures)	Analogique (AO) ou numérique (DO)	Seuil réglable	Faible coût, haute sensibilité, détection précoce des fissures, robuste.

II.10 Unité de traitement (microcontrôleur / système embarqué)

II.10.1 Rôle de l'unité de traitement

Dans un système SHM moderne, le capteur n'est plus un simple transducteur passif. Il devient un dispositif intelligent capable de traitement local des données. L'unité de traitement assure plusieurs fonctions critiques [23] :

- ❖ Acquisition des données : Échantillonnage et numérisation des signaux capteurs ;
- ❖ Traitement local (Edge Computing) : Réduction des données avant transmission ;
- ❖ Détection d'événements : Comparaison avec des seuils prédéfinis ;
- ❖ Communication : Gestion de la transmission des alertes ;
- ❖ Gestion d'énergie : Optimisation de la consommation (modes veille).

II.10.2 Choix du microcontrôleur Solution recommandée

L'Arduino Mega 2560 Rev3 est la carte microcontrôleur que nous avons sélectionnée comme unité centrale de traitement pour notre système intelligent de surveillance des structures. Ce choix repose sur la nécessité de disposer de ressources matérielles suffisantes pour gérer l'ensemble des capteurs (DHT11, SW420, ADXL345) et la communication GSM.



Figure II-16 Arduino Mega 2560

Caractéristiques techniques de l'Arduino Mega 2560 Rev3

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques de l'Arduino Mega 2560 et leurs valeurs :

Tableau II-10 Caractéristiques techniques de l'Arduino Mega 2560 Rev3

Caractéristique	Valeur
Microcontrôleur	ATmega2560
Architecture	AVR 8-bit
Fréquence d'horloge	16 MHz
Flash Memory	256 KB (dont 8 KB pour le bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Tension d'opération	5 V
Tension d'entrée (recommandée)	7-12 V
Tension d'entrée (limite)	6-20 V
Courant DC par pin I/O	20 mA (40 mA max)
Courant pin 3,3V	50 mA
Pins I/O numériques	54 (dont 15 PWM)
Pins d'entrée analogiques	16 (résolution 10 bits)
UART (ports série)	4
I ² C	1 (pins 20 SDA, 21 SCL)
SPI	1 (pins 50 MISO, 51 MOSI, 52 SCK)
Interruptions externes	6 (pins 2, 3, 18, 19, 20, 21)
Dimensions	101,52 mm × 53,3 mm
Poids	37 g
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C

Pourquoi choisir l'Arduino Mega plutôt que l'Arduino UNO?

Le tableau ci-dessous présente une comparaison détaillée entre l'Arduino UNO et l'Arduino Mega 2560, mettant en évidence les avantages décisifs du Mega pour notre application :

Tableau II-11 Comparaison entre l'Arduino UNO et l'Arduino Mega 2560

Caractéristique	Arduino UNO R3	Arduino Mega 2560 R3	Importance pour notre projet
Microcontrôleur	ATmega328P	ATmega2560	Le Mega offre plus de puissance
Flash Memory	32 kB	256 kB (8× plus)	Stockage des bibliothèques (DHT11, ADXL345, GSM)
SRAM	2 kB	8 kB (4× plus)	Gestion des buffers série et calculs FFT
EEPROM	1 kB	4 kB (4× plus)	Stockage permanent des seuils et configurations
Pins I/O numériques	14	54 (4× plus)	Connexion de multiples capteurs
Pins analogiques	6	16 (2,6× plus)	Pour futurs capteurs analogiques
Ports UART série	1	4 (4× plus)	GSM + débogage + modules futurs
Interruptions externes	2	6 (3× plus)	SW420 + ADXL345 + extensions
Pins I ² C dédiés	A4/A5	20/21	ADXL345 sans conflit

II.11 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons découvert les différentes technologies utilisées dans la détection des séismes et la surveillance des fissures dans les structures. Chaque type de capteur possède un rôle important selon les informations qu'il doit mesurer, comme les vibrations, l'accélération, la température ou encore les déformations. Nous avons aussi vu que les systèmes modernes de surveillance ne reposent pas uniquement sur les capteurs, mais également sur les systèmes d'acquisition, les réseaux de communication et les microcontrôleurs qui permettent de traiter et transmettre les données rapidement. Enfin, les composants choisis pour notre projet, tels que le capteur ADXL345, le SW420, le DHT11 et l'Arduino Mega 2560, représentent une solution simple, économique et efficace pour réaliser un système intelligent de surveillance sismique et de détection des fissures. Ces technologies constituent donc une base essentielle pour la réalisation pratique du système présenté dans la suite de ce travail.

Chapitre III :

**Conception, simulation, réalisation et
validation du système proposé**

Chapitre III Conception, simulation, réalisation et validation du système proposé

III.1 Introduction

Ce chapitre expose la transition des concepts théoriques de la surveillance structurelle vers une solution technologique concrète, en s'appuyant sur une approche interdisciplinaire qui lie le génie civil aux systèmes embarqués. La démarche débute par une analyse de la détection sismique et de l'intégrité des ouvrages afin de définir les objectifs de fiabilité du prototype, tout en justifiant la sélection de son architecture matérielle centrée sur un microcontrôleur connecté à des capteurs et des modules de communication. L'originalité du travail repose sur la complémentarité entre un volet génie civil, dédié à la fabrication expérimentale d'éprouvettes en béton armé pour simuler les dégradations des infrastructures, et un volet électronique, axé sur la conception, le routage et la réalisation d'un PCB dédié permettant d'optimiser l'intégration, le développement logiciel et la validation finale de ce système intelligent

III.2 Problématique

Le passage de la théorie à la pratique dans le domaine de la surveillance structurelle et sismique soulève des interrogations majeures. Lors de la planification de ce travail, nous avons été confrontés à un défi principal : comment concevoir un système capable de surveiller efficacement un bâtiment sans tomber dans la complexité des équipements industriels coûteux.

En analysant l'architecture de notre projet, plusieurs questions fondamentales se sont posées à nous :

La pertinence des données : Comment pouvons-nous nous assurer que le système distingue une vibration normale (comme le passage d'un camion ou un bruit urbain) d'un véritable choc sismique ou d'une défaillance structurelle ?

La corrélation des facteurs : Les fissures ne proviennent pas uniquement des secousses, elles évoluent aussi à cause des variations climatiques. L'enjeu était donc de trouver un moyen d'associer la surveillance des mouvements mécaniques à celle des facteurs environnementaux comme l'humidité.

La continuité de l'alerte : En cas de crise ou de séisme, les réseaux électriques et les connexions Internet sont souvent interrompus. Nous devons donc réfléchir à une solution autonome capable de stocker les données sur place et de transmettre des alertes instantanées de manière totalement indépendante.

C'est autour de ces interrogations clés que nous avons structuré notre démarche pour concevoir une solution à la fois fiable, réactive et accessible.

III.3 Objectifs du système de surveillance

L'objectif principal de notre travail est de concevoir et de réaliser un prototype fonctionnel, autonome et à bas coût, capable d'assurer une surveillance continue de l'intégrité des bâtiments. Nous visons à créer un dispositif capable de détecter précocement les anomalies pour prévenir les risques d'effondrement.

Pour y parvenir, nous nous sommes fixés plusieurs objectifs spécifiques :

Mesurer les secousses en temps réel : Développer un algorithme capable de capter instantanément les accélérations et les vibrations du sol afin de mesurer l'impact direct des mouvements sur la structure.

Suivre l'évolution des dégradations : Déployer un système de détection automatisé dédié au suivi de l'apparition des fissures et à l'évaluation de la fatigue des matériaux de construction.

Étudier l'impact de l'environnement : Intégrer un suivi de l'humidité ambiante pour analyser comment les facteurs climatiques influencent la dégradation lente du béton.

Garantir une alerte immédiate : Assurer une réactivité maximale du système à travers le déclenchement d'alarmes locales (sonores et visuelles) et l'envoi instantané de notifications à distance.

Sauvegarder l'historique des événements : Le système intègre une fonction d'archivage automatique permettant d'enregistrer en permanence les données et les résultats sur une carte SD afin de créer une base de données locale sécurisée. Cette sauvegarde continue est essentielle pour analyser avec précision le comportement mécanique des infrastructures, telles que les bâtiments, les ponts et les ouvrages d'art, suite à un sinistre majeur. De plus, ce stockage physique garantit une redondance de sécurité optimale, évitant ainsi toute perte d'informations en cas de défaillance du réseau de communication GSM.

III.4 Solutions techniques envisagées

Pour répondre aux défis techniques identifiés dans notre problématique, nous avons développé une approche méthodologique basée sur un système embarqué intelligent. Notre solution ne se contente pas de collecter des données, mais elle les organise de manière à offrir un diagnostic clair et une réaction rapide.

Nous avons structuré notre solution autour de trois axes principaux :

Le filtrage et la fusion des signaux vibratoires : Pour éliminer les fausses alertes liées aux vibrations quotidiennes, le système applique un filtrage logiciel basé sur la fusion des données de l'accéléromètre et du capteur de vibration. Ainsi, le seuil d'alerte critique n'est franchi que lors d'un choc majeur ou d'une secousse sismique réelle.

Le couplage des mesures mécaniques et environnementales : Conscients que les fissures évoluent sous l'effet combiné des forces physiques et du climat, nous avons intégré un suivi simultané de l'humidité. Cette solution permet d'analyser si l'apparition ou l'élargissement d'une dégradation est lié à un choc soudain ou à une usure lente favorisée par les conditions hygrométriques ambiantes.

La redondance de la sécurité et des données : Pour faire face aux coupures d'électricité ou de réseau durant un sinistre, nous avons mis en place une double stratégie de sortie. D'un côté, le système utilise le réseau GSM pour envoyer une alerte instantanée par SMS, et de l'autre, il enregistre toutes les données en continu sur une carte SD locale. Cette configuration garantit que les données restent accessibles pour une expertise ultérieure, même en cas d'isolement total du bâtiment.

III.5 Présentation des composants matériels (Hardware)

III.5.1 Arduino Mega 2560

Définition

La Figure III-1 présente l'Arduino Mega 2560 est une carte de développement électronique haut de gamme basée sur le microcontrôleur AVR **ATmega2560**. Cadencée à une fréquence d'horloge de 16 MHz, cette carte intègre une mémoire Flash de 256 kB dédiée au stockage du programme, 8 kB de SRAM pour les variables dynamiques et 4 kB d'EEPROM. Elle se distingue par une connectivité massive comprenant 54 broches d'entrées/sorties numériques (dont 15 exploitables en PWM), 16 entrées analogiques, ainsi que 4 interfaces matérielles de communication série (UART) indépendantes [24].



Figure III-1 Arduino Mega 2560.

Justification du choix

Le choix de cette plateforme est dicté par la complexité même du système de surveillance. La gestion simultanée de plusieurs bibliothèques logicielles lourdes (notamment pour l'affichage LCD, l'écriture sur Carte SD et la pile réseau du module GSM) sature rapidement la mémoire d'une carte standard comme l'Arduino Uno. De plus, la présence des 4 ports UART physiques s'avère indispensable pour établir une liaison de communication bidirectionnelle stable avec le module SIM800L tout en maintenant actif le moniteur série pour le débogage en temps réel [25].

III.5.2 Le capteur d'accélération numérique (ADXL345)

Définition

L'ADXL345 est un accéléromètre triaxial (axes X, Y, Z) ultra-compact à technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) conçu pour une détection à ultra-basse consommation. Il offre une haute résolution allant jusqu'à 13 bits avec la capacité de mesurer des accélérations jusqu'à ± 16 g. Le capteur structure ses données sous forme numérique et les transmet via un bus série I2C ou SPI, éliminant ainsi le besoin de conversion analogique-numérique externe. Il intègre également des fonctions de détection d'activité, de chute libre et de chocs soudains directement gérées au niveau du silicium [26].

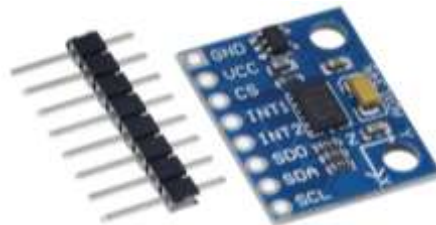


Figure III-2 Capteur d'accélération numérique (ADXL345).

Justification du choix

Dans le cadre de la surveillance sismique, ce capteur joue un rôle central en captant la dynamique des mouvements oscillatoires des structures. Sa sensibilité élevée permet de détecter les micro-vibrations initiales et les modifications de l'inclinaison statique d'un ouvrage d'art (déformation de l'assiette structurelle due à un affaissement du sol). De plus, le choix de l'interface numérique I2C garantit une immunité totale contre les bruits parasites industriels et électromagnétiques qui perturbent fréquemment les lignes analogiques de longue distance dans les chantiers de génie civil [27].

III.5.3 Le capteur de vibration (SW-420)

Définition

La Figure III-3 présente le SW-420 est un module de détection piézo-mécanique binaire de type normalement fermé. Sa structure interne est composée d'un ressort conducteur suspendu au sein d'une enceinte métallique. En l'absence de sollicitation, le contact électrique est maintenu. Dès qu'un impact ou une vibration externe survient, l'inertie du ressort rompt brièvement le circuit. Ce signal transitoire est immédiatement traité par un comparateur de tension intégré de type LM393 qui redresse le signal pour délivrer un état logique net (0 ou 1) [27].



Figure III-3 Capteur de vibration piézo-mécanique (SW-420).

Justification du choix

L'intégration du SW-420 répond à une exigence de réactivité absolue en temps réel. Alors que l'accéléromètre demande un temps de traitement logiciel pour calculer l'amplitude d'une secousse, le SW-420 fonctionne comme une interruption matérielle (Trigger). Grâce à son potentiomètre de réglage, il est calibré pour filtrer l'activité urbaine classique et réagir instantanément aux chocs structurels majeurs, réveillant immédiatement les fonctions d'alerte et de transmission du système sans solliciter en permanence l'unité de calcul centrale [25].

III.5.4 Le capteur d'humidité et de température (DHT11)

Définition

La Figure III-4 présente Le DHT11 est un capteur numérique composite délivrant un signal calibré contenant les valeurs d'humidité relative et de température ambiante. Il embarque un composant résistif pour la mesure de l'humidité (élément polymère) et une thermistance de type NTC pour la température. Ce module intègre son propre microcontrôleur 8 bits qui gère la conversion des données et pilote la communication avec l'Arduino via un protocole série propriétaire utilisant une seule ligne de données (Single-Wire) [28].



Figure III-4 Capteur numérique d'humidité et de température (DHT11).

Justification du choix

La durabilité du béton armé est intimement liée aux conditions thermo hygrométriques de son environnement. Un taux d'humidité élevé accélère la pénétration du dioxyde de carbone (carbonatation) et entraîne la corrosion des armatures en acier, provoquant l'éclatement du béton. L'intégration du DHT11 permet d'effectuer un suivi corrélatif : le système peut analyser si l'apparition ou l'élargissement d'une fissure est d'origine purement mécanique (séisme) ou s'il est favorisé par des dégradations lentes induites par le climat ambiant [29].

III.5.5 La Jauge de Contrainte (BF350-3AA)

Définition

La Figure III-5 présente la jauge de contrainte BF350 est un capteur résistif de précision conçu pour mesurer les micro-déformations des matériaux [24]. Son principe repose sur l'effet piézorésistif : lorsqu'une force mécanique est appliquée sur la structure (béton ou acier), le fil conducteur de la jauge s'étire ou se comprime, modifiant ainsi sa résistance électrique $350\ \Omega$. Étant donné que ces variations de résistance sont extrêmement faibles, elle est couplée à un circuit en Pont de Wheatstone et un amplificateur de signal pour convertir la déformation mécanique en une tension électrique lisible par l'Arduino Mega 2560 [27].



Figure III-5 La Jauge de contrainte résistive (BF350-3AA).

Justification du choix

L'intégration de la jauge BF350 est indispensable pour passer d'une simple détection de mouvement à une analyse structurale quantitative. Dans notre projet, elle permet de mesurer la déformation relative subie par les éprouvettes en béton armé sous l'effet des charges ou des vibrations sismiques. Contrairement l'accéléromètre, qui détecte les mouvements et les

accélérations de la structure, la jauge de contrainte surveille les variations de déformation du béton afin de mettre en évidence d'éventuelles fissurations. Ce choix est justifié par sa capacité à détecter les déformations pouvant indiquer l'apparition de fissures, offrant ainsi un système d'alerte précoce avant la rupture brutale de la structure [29].

III.5.6 Le Protocole de communication I2C (Inter-Integrated Circuit)

Définition

La Figure III-6 présente l'I2C est un bus de communication série synchrone, bidirectionnel et multi-maître, développé à l'origine par Philips. Il repose sur l'utilisation exclusive de deux lignes de signal : SDA (Serial Data Line) pour le transfert des octets de données et SCL (Serial Clock Line) pour la distribution du signal d'horloge assurant la synchronisation. Chaque périphérique esclave connecté sur le bus possède une adresse physique codée sur 7 bits, permettant au maître de cibler individuellement chaque composant [26].



Figure III-6 Schéma du bus I2C

Justification du choix

L'adoption du protocole I2C optimise radicalement l'architecture matérielle du système. Au lieu de monopoliser des dizaines de broches pour l'acquisition des données de l'accéléromètre ADXL345 et la gestion de l'affichage LCD, l'I2C permet de mettre ces modules en dérivation sur les deux mêmes lignes de l'Arduino Mega. Cette réduction drastique de la filerie limite les risques de faux contacts, simplifie la maintenance du circuit imprimé et laisse le reste des broches de l'Arduino disponible pour les extensions futures [24].

III.5.7 Le module de communication GSM (SIM800L)

Définition

La Figure III-7 présente Le SIM800L est un module GSM (Global System for Mobile communications) /GPRS (General Packet Radio Service) quadri-bande miniature, hautement intégré, capable de gérer les transmissions de voix, de SMS et de données sur les fréquences mondiales standard. Il communique avec l'Arduino via une interface UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) [24]. Ce module est doté d'une gestion intelligente de l'alimentation, capable de gérer des pics de courant importants lors de la recherche du réseau.

Il utilise une pile de protocoles TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) à intégrée et se pilote via un jeu étendu de Commandes AT permettant de configurer les notifications d'urgence et les envois périodiques de données télémétriques [30].



Figure III-7 Module de communication (GSM SIM800L).

Justification du choix

Le choix du SIM800L pour notre système de surveillance sismique repose sur sa fiabilité exceptionnelle en situation de crise. Alors que les infrastructures internet (Wi-Fi ou Ethernet) sont les premières à être endommagées lors d'un séisme majeur, le réseau cellulaire (GSM) bénéficie d'une architecture décentralisée plus résiliente [29]. La justification technique majeure réside dans sa capacité à fonctionner de manière autonome : dès qu'un seuil critique de vibration ou de déformation est atteint, le module déclenche un protocole d'urgence pour envoyer une alerte au responsable du système. Son format compact et sa faible consommation en mode veille en font la solution idéale pour un système de monitoring permanent [25].

III.5.8 Le Régulateur de Tension Buck (LM2596)

Définition

La Figure III-8 présente le LM2596 est un convertisseur de puissance de type "Step-Down" (Buck) à découpage. Il est capable de réduire une tension d'entrée élevée (jusqu'à 40 V) vers une tension de sortie stable et réglable (généralement 4.2 V pour notre système) avec un courant de sortie pouvant atteindre 3 A. Contrairement aux régulateurs linéaires classiques, le LM2596 offre un rendement pouvant atteindre environ 90 % selon les conditions de fonctionnement, ce qui minimise la dissipation thermique et prolonge la durée de vie des composants électroniques sensibles [28].



Figure III-8 Régulateur de tension Buck (LM2596).

Justification du choix

L'utilisation du LM2596 est cruciale pour la stabilité du système, car certains modules comme le SIM800L nécessitent des pointes de courant brèves mais intenses (jusqu'à 2A) que le régulateur interne de l'Arduino Mega ne peut pas fournir sans surchauffer. Ce module garantit une alimentation propre et régulée pour l'ensemble des capteurs et actionneurs, évitant ainsi les redémarrages intempestifs du système lors des phases de transmission GSM ou de déclenchement du buzzer. C'est l'organe qui assure la robustesse électrique de l'ensemble de l'installation [27].

III.5.9 Régulateur de tension linéaire LM7809

Définition

La Figure III-9 présente le LM7809 est un régulateur de tension linéaire monolithique conçu pour fournir une tension de sortie fixe et stable de +9 V avec un courant maximal de 1.5 A. Selon la fiche technique officielle, ce composant intègre des protections internes automatiques contre les surcharges thermiques et les courts-circuits, assurant une grande robustesse électrique au circuit [31].

Justification du choix

Optimisation thermique de l'Arduino il abaisse la tension de la batterie à un niveau intermédiaire de 9 V, ce qui soulage le régulateur interne de la carte Arduino Mega 2560 et évite sa surchauffe lors d'un fonctionnement permanent. Immunité au bruit (Filtrage) contrairement aux convertisseurs à découpage, le LM7809 offre une tension linéaire très propre sans parasites haute fréquence, ce qui est indispensable pour préserver la précision des capteurs sismiques [31].



Figure III-9 Régulateur de tension LM7809

III.5.10 Le module lecteur de carte SD

Définition

La Figure III-10 présente ce module est une interface matérielle conçue pour permettre aux microcontrôleurs d'accéder en lecture et en écriture aux cartes mémoires Flash au format standard. Il intègre un adaptateur de niveau logique (souvent à base de circuits intégrés ou de résistances) pour adapter les signaux 5 V de l'Arduino aux tolérances 3.3 V des cartes SD. La communication est régie par le protocole synchrone SPI (Serial Peripheral Interface), permettant des taux de transfert de données rapides requis pour l'enregistrement continu [28].



Figure III-10 Le Module lecteur de carte SD

Justification du choix

La fonction essentielle de ce module est d'agir comme la "boîte noire" structurelle du bâtiment. Lors d'un séisme de grande magnitude, les connexions cellulaires peuvent être temporairement saturées ou interrompues. L'enregistrement local en continu au *format.csv* ou *.txt* garantit qu'aucune donnée de télémétrie critique ne soit perdue. Ces fichiers d'historique s'avèrent indispensables après un sinistre pour permettre aux ingénieurs experts d'analyser la chronologie de la défaillance et d'évaluer la stabilité résiduelle de l'ouvrage [25].

III.5.11 L'afficheur LCD (Liquid Crystal Display)

Définition

La Figure III-11 présente l'afficheur LCD 16x2 est un écran de visualisation alphanumérique capable d'éditer simultanément 32 caractères ASCII répartis sur deux lignes de 16 colonnes. Chaque caractère est généré par une matrice de 5×8 pixels. Pour éviter une gestion parallèle complexe nécessitant l'utilisation de 6 à 8 broches de données, l'écran est

intimement couplé à un contrôleur esclave I2C PCF8574, convertissant le flux de données série du bus en commandes parallèles pour le rétroéclairage et les cristaux liquides [24].



Figure III-11 L'Afficheur alphanumérique LCD 16x2

Justification du choix

Ce composant constitue le pivot de l'interface Homme-Machine (IHM) sur site. Lors de la phase de démarrage du système, il affiche pas à pas le statut d'initialisation des périphériques (ex: "SD Init OK", "GSM Searching..."), ce qui facilite la maintenance. En mode d'exploitation normal, il fournit aux techniciens de maintenance ou aux équipes de secours une lecture visuelle directe et immédiate des grandeurs physiques (amplitude de déformation, accélération maximale, humidité relative) sans exiger le déploiement d'un terminal informatique externe [30].

III.5.12 Le Buzzer

Définition

La Figure III-12 présente le BUZZER actif est un transducteur électroacoustique piézoélectrique compact. À l'inverse des modèles passifs qui requièrent un signal modulé en fréquence (PWM) pour vibrer, le BUZZER actif intègre un circuit oscillateur interne. Dès qu'une tension continue stabilisée de 5 V lui est appliquée sur sa broche d'alimentation, le cristal piézoélectrique entre en résonance mécanique constante pour générer une onde sonore de forte intensité, généralement fixée autour de 2.3 kHz [25].



Figure III-12 L'Avertisseur sonore (Buzzer actif 5V).

Justification du choix

La sécurité humaine étant la priorité absolue de tout dispositif de monitoring de structures, le buzzer actif représente la première ligne de défense locale. Sa commande logicielle est d'une simplicité critique : une simple mise à l'état HAUT d'une broche de l'Arduino suffit à déclencher l'alerte. Cette simplicité logicielle prémunit le système contre les

bugs d'exécution au moment où une alerte d'évacuation immédiate doit être diffusée auprès des occupants du bâtiment en cas d'effondrement imminent [27].

III.6 Organigramme de l'algorithme de détection de séisme et de fissure

Afin de décrire le fonctionnement de l'algorithme de détection des phénomènes sismiques et des fissures, la Figure III-13 présente l'organigramme correspondant. Cet organigramme met en évidence les différentes étapes exécutées, depuis l'initialisation des différents éléments du système jusqu'à l'envoi des messages SMS et au déclenchement des appels d'alerte en cas de détection d'une situation critique.

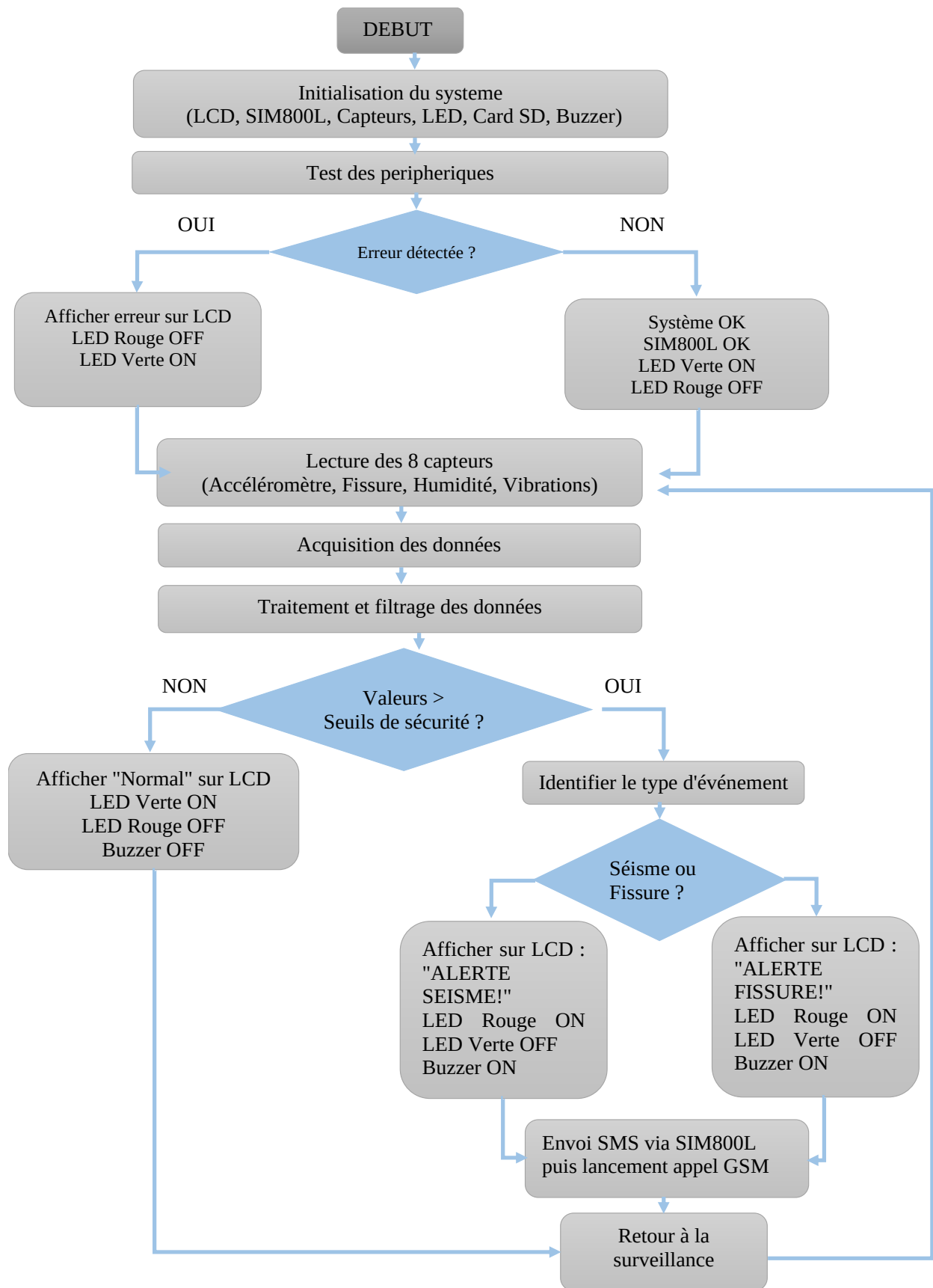


Figure III-13 Organigramme de l'algorithme de détection de séisme et de fissure

III.7 Volet Génie Civil : Protocole expérimental et confection des éprouvettes

III.7.1 Procédure de réalisation des éprouvettes en béton armé

Pour tester l'efficacité de notre système de surveillance, nous avons procédé à la fabrication des éprouvettes en béton armé en suivant les étapes expérimentales suivantes :

Préparation et Dosage

La Figure III-14 illustre l'étape de préparation et de dosage des constituants de base du béton armé standard, à savoir le ciment, l'eau, le sable et deux granulométries de gravier, permettant d'obtenir une compacité optimale du mélange.

La quantité des mélanges pour 1 m^3

Gravier G (8/15) ----- 577.5 kg/m^3

Gravier G (3/8) ----- 577.5 kg/m^3

Sable S ----- 749 kg/m^3

Ciment C ----- 350 kg/m^3

Eau E ----- 182 kg/m^3

Pour l'éprouvette utilisée ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$)

$10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3 = 0.004 \text{ m}^3$

Gravier G (8/15) :

$$\begin{cases} 1 \text{ m}^3 & \text{--- -- --} > 577.5 \text{ kg} \\ 0.004 \text{ m}^3 & \text{--- -- --} > X \text{ kg} \end{cases}$$

$\Rightarrow \text{Mass G (8/15)} = 2.31 \text{ kg}$

$\text{Mass G (3/8)} = 2.31 \text{ kg}$

$\text{Mass S} = 2.996 \text{ kg}$

$\text{Mass C} = 1.4 \text{ kg}$

$\text{Mass E} = 0.728 \text{ kg}$.



Figure III-14 Étape de préparation, pesage et dosage des constituants

Malaxage

Les composants secs (ciment, sable et les deux types de graviers) ont d'abord été introduits dans un malaxeur mécanique comme présenté dans la Figure III-15 présente pour une pré-homogénéisation, suivie de l'ajout progressif de l'eau afin d'obtenir un mélange parfaitement homogène et régulier



Figure III-15 Phase de malaxage mécanique du mélange

Préparation des Moules

La Figure III-16 illustre l'utilisation de moules métalliques de la dimension (40 x 10 x 10 cm³) spécifiques, préalablement huilés pour faciliter le décoffrage.



Figure III-16 Préparation et huilage des moules métalliques

Confection et ligaturage du ferrailage

La Figure III-17 présente l'étape de confection et de ligaturage du ferrailage. Les barres d'acier ont été assemblées et attachées à l'aide d'un fil de ligature pour former les armatures des éprouvettes en béton armé. Cette opération garantit leur stabilité avant le coulage du béton.



Figure III-17 Confection et ligaturage de ferrailage

Coulage de la première couche

La figure III-18 présente une première couche de béton est versée dans le moule pour constituer l'enrobage inférieur.



Figure III-18 Coulage de la couche d'enrobage

Mise en place de l'armature

La Figure III-19 présente comme insérer deux nappes de l'armature (inférieure et supérieure) pour obtenir du béton armé.



Figure III-19 Mise en place de l'armature en acier (Ferrailage)

Remplissage et Vibration

Le remplissage est complété par une deuxième couche de béton, puis compacté à l'aide d'un vibreur pour éliminer les bulles d'air, comme montré dans la Figure III-20



Figure III-20 Remplissage final et serrage par vibration mécanique

Finition et Séchage

La Figure III-21 présente la surface est lissée pour obtenir une finition plane, puis les éprouvettes sont entreposées pour le processus de durcissement.



Figure III-21 Surfaçage, finition et cure des éprouvettes

Démoulage et protocole de cure des éprouvettes (poutres)

Après un durcissement initial de 24 à 48 heures dans les moules, La moitié des mini-poutres en béton armé ont été délicatement démoulées comme présenté dans la figure III-22. Afin d'étudier l'impact des facteurs environnementaux et de l'humidité sur la dégradation structurelle, nous avons divisé nos échantillons en deux lots distincts soumis à des protocoles de cure différents



Figure III-22 Vue globale d'une mini-poutre en béton armé après décoffrage

Éprouvettes dans le milieu immergé (milieu humide)

La moitié béton des mini-poutres a été totalement immergée dans des bacs d'eau pendant une période de 26 jours. Ce processus de cure humide standard permet d'assurer une hydratation complète du ciment, maximisant ainsi la résistance mécanique théorique du béton et stabilisant sa structure interne avant les essais. Comme présenté dans la figure III-23.



Figure III-23 Processus de cure humide et immersion du premier lot d'éprouvettes

Éprouvettes témoins (Milieu sec)

L'autre moitié des mini-poutres en béton a été conservée à l'air libre, en milieu sec, dans l'environnement du laboratoire comme montré dans la Figure III-24. Ce lot sert de témoin pour simuler un béton soumis à une dessiccation ou à des conditions climatiques arides, favorisant ainsi l'étude de la propagation des micro-fissures de retrait.



Figure III-24 Stockage à l'air libre (milieu sec) du second lot d'éprouvettes témoins

III.8 Conception et réalisation du circuit imprimé (PCB) via Proteus

III.8.1 Conception du schéma électronique général du système sous Proteus 8 ISIS

La figure III-25 présente la première phase a consisté à concevoir l'architecture logique globale du système de surveillance au sein de l'interface ISIS (Schematic Capture) de Proteus 8. Nous avons intégré le composant central, à savoir le microcontrôleur Arduino Mega 2560, et câblé virtuellement l'ensemble des modules périphériques requis. Cette étape a permis de structurer les connexions pour le module GSM SIM800L, l'afficheur LCD, le lecteur de carte SD, ainsi que les interfaces pour les capteurs doubles, incluant deux capteurs d'accélération ADXL, deux capteurs d'humidité DHT11, deux modules de vibration VIB et les entrées pour jauges de déformation BF1/BF2. Nous avons également intégré les composants de protection et de régulation, incluant les diodes LED de statut (D1, D2), les résistances d'adaptation, un fusible de sécurité (FU1) et les régulateurs de tension (U3) pour stabiliser les lignes d'alimentation de 9V et 4,2V.

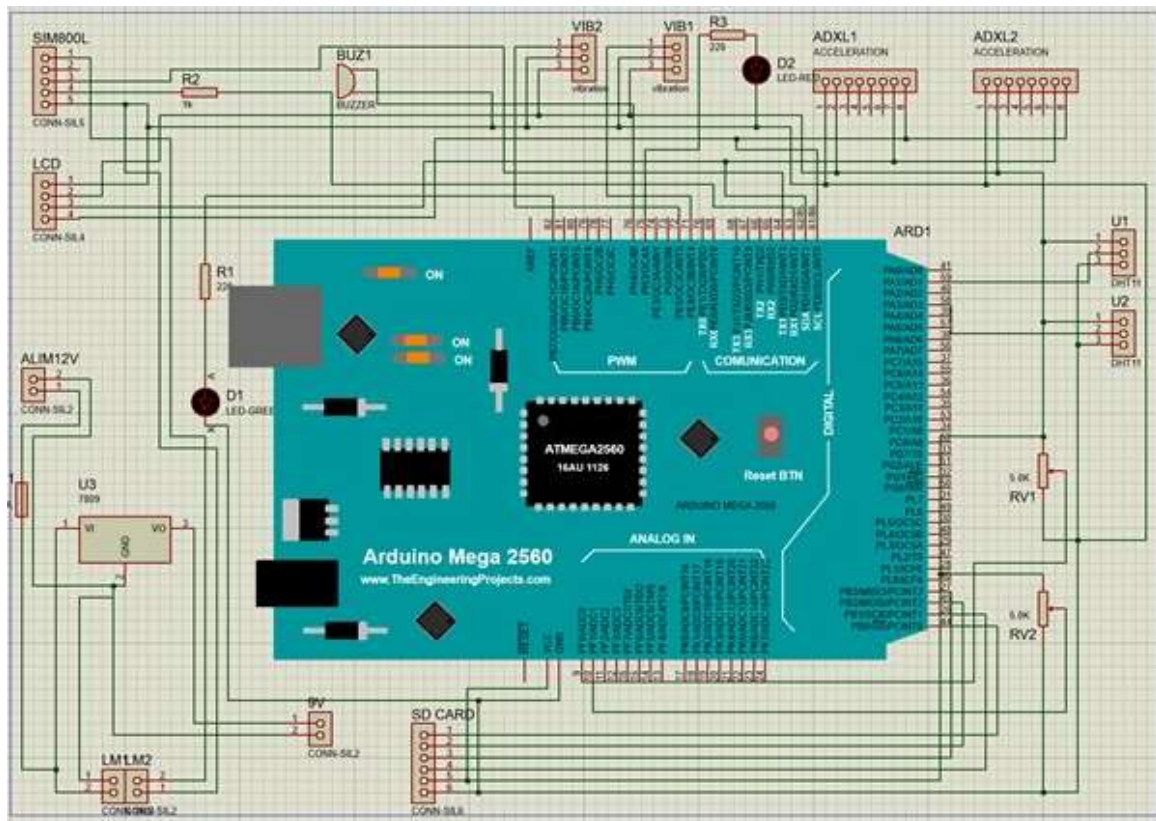


Figure III-25 Conception du schéma électronique général du système sous Proteus 8 ISIS.

Visualisation tridimensionnelle (3D Visualizer)

La figure III-26 présente la dernière phase logicielle avant la fabrication matérielle a été l'exploitation de l'outil de rendu d'images intégré **3D Visualizer** de Proteus 8. Cette inspection virtuelle en trois dimensions permet de valider l'ergonomie générale du prototype, de vérifier l'espacement mécanique exact entre les modules volumineux (tels que le gros condensateur de filtrage, le buzzer cylindrique BUZ1, et les borniers à vis) et de s'assurer du positionnement correct des broches mâles/femelles destinées à s'emboîter directement sur l'Arduino Mega. Ce rendu confirme la conformité géométrique et l'aspect esthétique final de notre carte d'interface personnalisée.

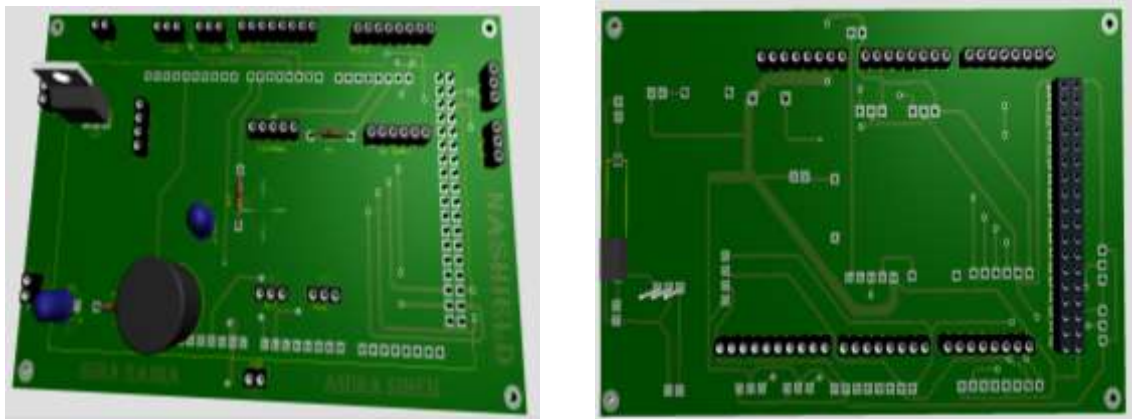


Figure III-26 Modélisation et aperçu tridimensionnel (Rendu 3D) de la carte Shield finale sous Proteus 8.

Routage physique et layout de la carte (PCB Layout)

Après la validation électrique du schéma, nous avons basculé vers le module **ARES (PCB Layout)** pour concevoir la topologie physique de la carte de circuit imprimé. Cette étape consiste à positionner les empreintes réelles (Footprints) des composants et à tracer les pistes conductrices en cuivre. Nous avons opté pour une configuration optimisée en routant les pistes de puissance en couche supérieure (**Top Copper** en rouge) et d'autres signaux en couche inférieure (**Bottom Copper** en bleu) pour éviter les croisements destructeurs. Une attention particulière a été portée au dimensionnement des lignes d'alimentation pour tolérer les pics de courant du module GSM sans échauffement. Les mentions nominatives de l'équipe ainsi que le nom du projet "NASHIELD" ont été directement intégrés sur la sérigraphie de la carte, comme La figure III-27

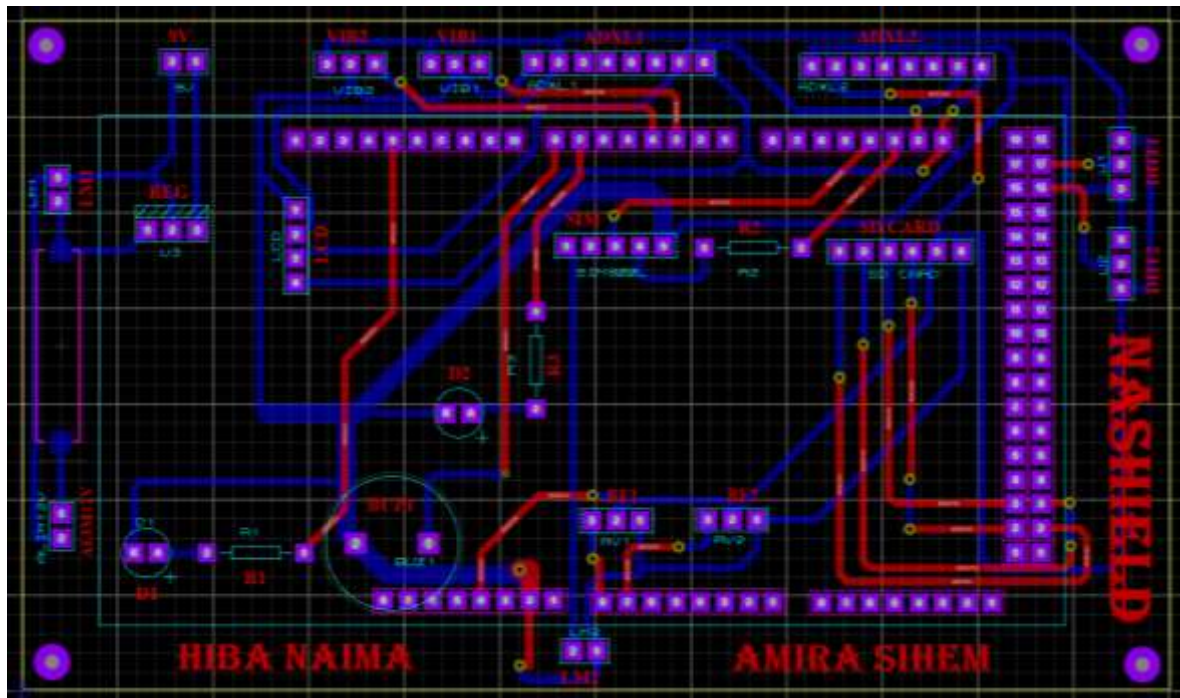


Figure III-27 Routage des pistes de cuivre bi-couche et placement des empreintes sous Proteus 8 ARES.

III.8.2 Réalisation matérielle et procédé de fabrication chimique du PCB

Après la validation des fichiers de conception sous Proteus 8, nous sommes passés à la phase de fabrication pratique au sein du laboratoire. Ce procédé suit un protocole physico-chimique rigoureux structuré en cinq étapes successives :

L'insolation (Exposition aux Rayons U.V)

La Figure III-28 présente le dessin des pistes imprimé sur un papier calque transparent (appelé typon) est positionné avec précision et plaqué sous vide sur une plaque d'époxy pré-sensibilisée (recouverte d'une résine photosensible). L'ensemble est ensuite introduit dans une insoleuse industrielle où il est soumis à des rayonnements ultraviolets (U.V.) pendant un temps optimisé (généralement entre 50 et 250 secondes). Les rayons U.V. traversent les zones transparentes du typon et fragilisent la résine exposée, tandis que les pistes noires masquent et protègent la résine sous-jacente.

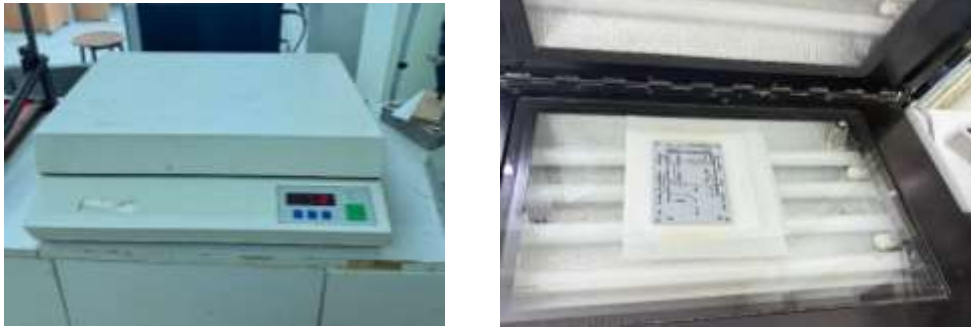


Figure III-28 Processus d'insolation de la carte sous vide à l'aide de l'insoleuse U.V.

La révélation

La Figure III-29 présente Une fois l'insolation terminée, la carte est plongée dans un bain chimique contenant un révélateur positif, composé d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). En quelques secondes, ce produit dissout uniquement la résine qui a été exposée aux U.V. Cette action laisse apparaître à nu le cuivre indésirable (hors-pistes et pastilles).



Figure III-29 Inspection visuelle des pistes de cuivre après l'étape de gravure chimique

La gravure chimique

La Figure III-30 présente la carte est ensuite introduite dans une machine à graver verticale contenant une solution de perchlorure de fer. Ce composé chimique attaque et dissout le cuivre visible qui n'est plus protégé par la résine. Après quelques minutes d'agitation et sous l'effet de la température du bain, tout le cuivre excédentaire disparaît, faisant apparaître la plaque de substrat isolant (époxy), tandis que les pistes et les pastilles de notre shield restent parfaitement formées.



Figure III-30 Inspection visuelle des pistes de cuivre après l'étape de gravure chimique

L'élimination (Le nettoyage final de la résine)

Pour rendre le cuivre des pistes accessible pour le soudage, la carte subit un second traitement chimique. Elle est à nouveau plongée dans un bain d'hydroxyde de sodium (NaOH), mais cette fois-ci fortement dosé. Cette concentration élevée permet d'éliminer la résine protectrice restante qui recouvrait encore les pistes. À la sortie de ce bain, le cuivre pur, propre et brillant apparaît sur l'ensemble du circuit comme La Figure III-31



Figure III-31 Vue finale de la carte PCB "NASHIELD" nettoyée et prête pour le perçage

Le perçage

La Figure III-32 présente La dernière étape mécanique consiste à utiliser une perceuse sensitive de précision munie de forets de diamètres adaptés (généralement 0.8 mm pour les signaux et 1 mm à 1.2mm pour les borniers d'alimentation et supports de modules). Cette opération permet de perforer les pastilles de cuivre afin de pouvoir y insérer ultérieurement les broches des composants électroniques avant l'étape finale de soudure.

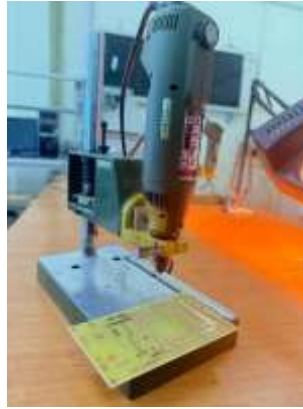


Figure III-32 Perceuse à colonne pour circuits imprimés (PCB).

III.8.3 Assemblage, soudage et intégration matérielle des composants

Une fois la carte de circuit imprimé (PCB) percée et nettoyée, nous avons procédé à l'étape finale de l'intégration matérielle. Cette phase consiste à implanter physiquement les composants électroniques et à assurer leur liaison électrique permanente.

Cette phase finale consiste à concrétiser notre prototype en assemblant physiquement les composants électroniques sur le PCB fabriqué. Le processus a débuté par l'implantation hiérarchique des éléments sur la face supérieure de la carte, en positionnant d'abord les composants discrets et les blocs de protection, puis en installant des barrettes de broches (Pin headers) et des borniers à vis afin d'assurer une modularité optimale permettant d'emboîter directement l'Arduino Mega 2560 et de connecter les différents modules sans les exposer à la chaleur. Ensuite, le brasage a été effectué manuellement sur la face inférieure de la carte à l'aide d'un fer à souder thermorégulé et d'un alliage d'étain de haute qualité, en appliquant une technique rigoureuse pour obtenir des joints lisses, concaves et robustes capables de résister aux sollicitations vibratoires. Enfin, l'ensemble du circuit a fait l'objet d'une inspection visuelle méticuleuse combinée à des tests de continuité systématiques au multimètre numérique, validant ainsi l'absence totale de courts-circuits entre les lignes d'alimentation et la masse avant la première mise sous tension sécurisée du système, comme montré dans la Figure II-33.

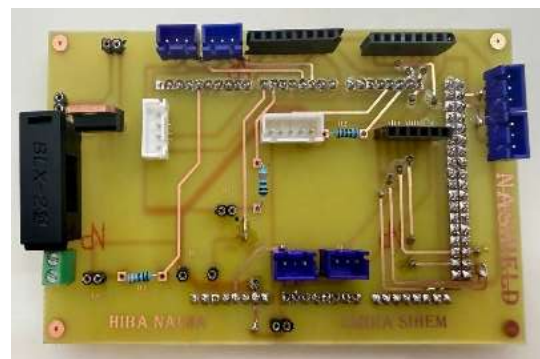
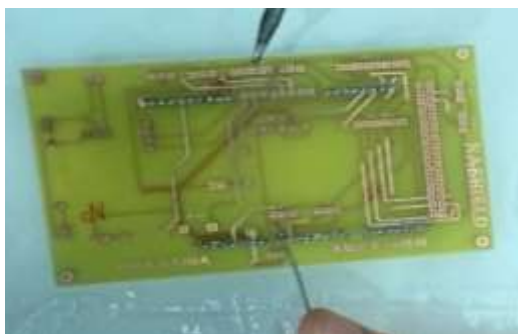


Figure III-33 Différentes phases d'assemblage et de soudage manuel du Shield

III.9 Conception et intégration du système dans son boîtier de protection

description et aménagement matériel

Afin de protéger l'ensemble des circuits électroniques contre les facteurs environnementaux et mécaniques, nous avons conçu un boîtier de protection compact aux dimensions optimisées de $20 \times 20 \times 10$ cm. Ce boîtier a fait l'objet d'un usinage précis sur ses différentes faces pour accueillir les interfaces d'interaction et de connectivité :

Face avant (Interface Homme-Machine) : Elle comporte des ouvertures dédiées à l'intégration de l'écran LCD pour l'affichage des données en temps réel, de deux diodes LED pour la signalisation visuelle des états du système, ainsi qu'un espace pour le buzzer d'alerte sonore.

Face latérale (Télécommunication) : Elle est percée pour fixer solidement l'antenne externe du module GSM (SIM800L), garantissant ainsi une puissance de signal optimale pour la transmission des alertes.

Face arrière/latérale (Alimentation) : Elle intègre le bouton de mise sous tension (Interrupteur Power) et l'orifice de sortie du connecteur de recharge de la batterie.



Figure III-34 Vue globale du boîtier de protection finalisé avec ses interfaces externes

III.10 Validation expérimentale globale du système

III.10.1 Validation de la détection des vibrations sismiques

Détection des vibrations sismiques

Dans le cadre de la validation expérimentale de notre prototype, nous avons réalisé une première série d'essais visant à vérifier la capacité du système à détecter des vibrations sismiques simulées. Une éprouvette en béton armé instrumentée a été placée sur un dispositif mécanique générant des ondes de choc contrôlées.

Le capteur de vibration SW-420, fixé à la surface du béton, a réagi instantanément aux impulsions mécaniques en fournissant un signal logique. De même, l'accéléromètre triaxial

ADXL345 a également enregistré les variations d'accélération sur les trois axes, permettant de confirmer la présence et l'intensité des vibrations appliquées, comme montrée la figure III-35.



Figure III-35 Validation de la détection des vibrations sismiques

Activation du système d'alerte et de communication

Cette détection physique a déclenché automatiquement une alarme locale composée d'un buzzer et d'une LED rouge pour signaler le danger immédiat aux occupants de la structure.

En parallèle, le module GSM a transmis instantanément un SMS et effectué un appel téléphonique afin de notifier à distance les services de secours et de centraliser l'information en temps réel, confirmant ainsi la réactivité de notre système de communication embarqué, comme la figure III-36.

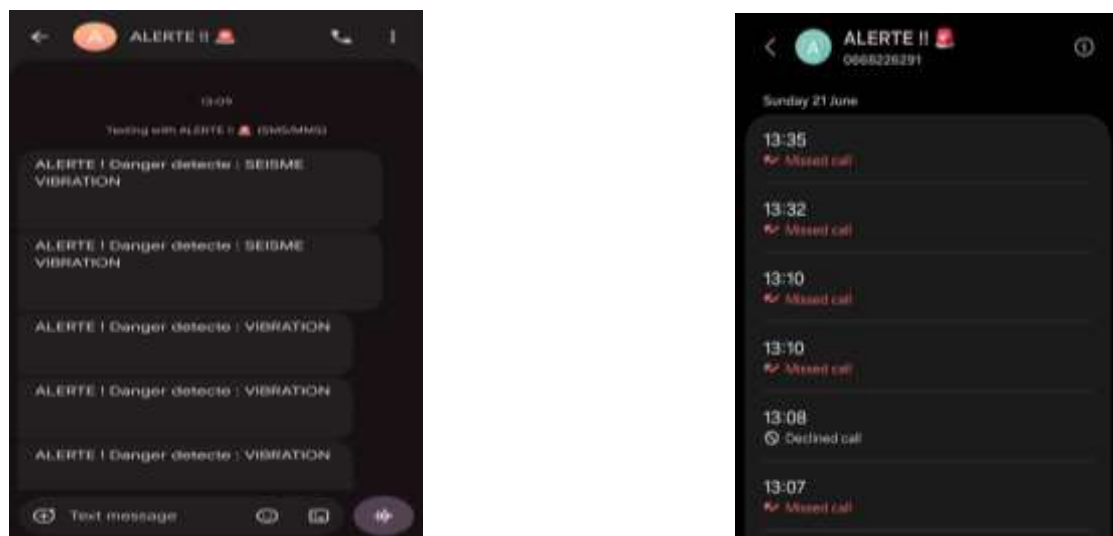


Figure III-36 Capture d'écran de l'appel et du SMS d'alerte reçu via le module GSM lors de la détection des vibrations

III.10.2 Surveillance de la fissuration sous contrainte mécanique

Détection et surveillance des fissures sous charge

La deuxième phase des essais a consisté à évaluer la capacité du système à détecter l'apparition de fissures dans le béton. Pour cela, nous avons utilisé une machine de fissuration, capable d'appliquer une contrainte progressive sur l'éprouvette jusqu'à la formation d'une microfissure. La jauge de contrainte BF350-3AA, collée à la surface du béton, a mesuré les déformations locales et a détecté avec succès le début de la fissuration.

Par ailleurs, l'accéléromètre ADXL345 a enregistré les variations d'accélération associées au phénomène de fissuration. Les données recueillies ont montré une corrélation entre l'intensité de la sollicitation appliquée et l'amplitude des signaux mesurés, confirmant ainsi la sensibilité et la fiabilité du système, comme la figure III-37.



Figure III-37 Surveillance de la fissuration sous contrainte mécanique

Réponse du système et validation des essais

Dès la détection de l'anomalie, le système a activé le buzzer et la LED rouge, puis a envoyé un SMS et lancé un appel téléphonique via le module GSM afin d'avertir l'utilisateur en temps réel. Ces essais préliminaires démontrent ainsi l'efficacité du prototype pour la détection des séismes et la surveillance des fissures dans les structures en béton, comme la figure III-38

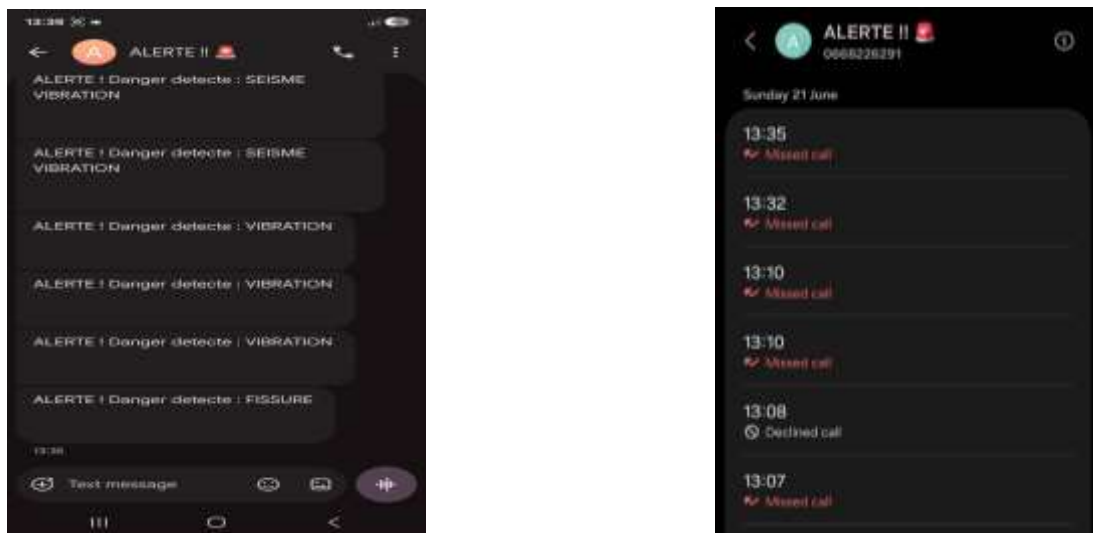


Figure III-38 Capture d'écran de l'appel et du SMS d'alerte reçu via le module GSM lors de la détection des fissures

Comme l'illustre la Figure III-39 (a), le message « **System Ready Monitoring...** » signifie que le système est correctement démarré et qu'il est prêt à surveiller en permanence les vibrations sismiques et les fissures.

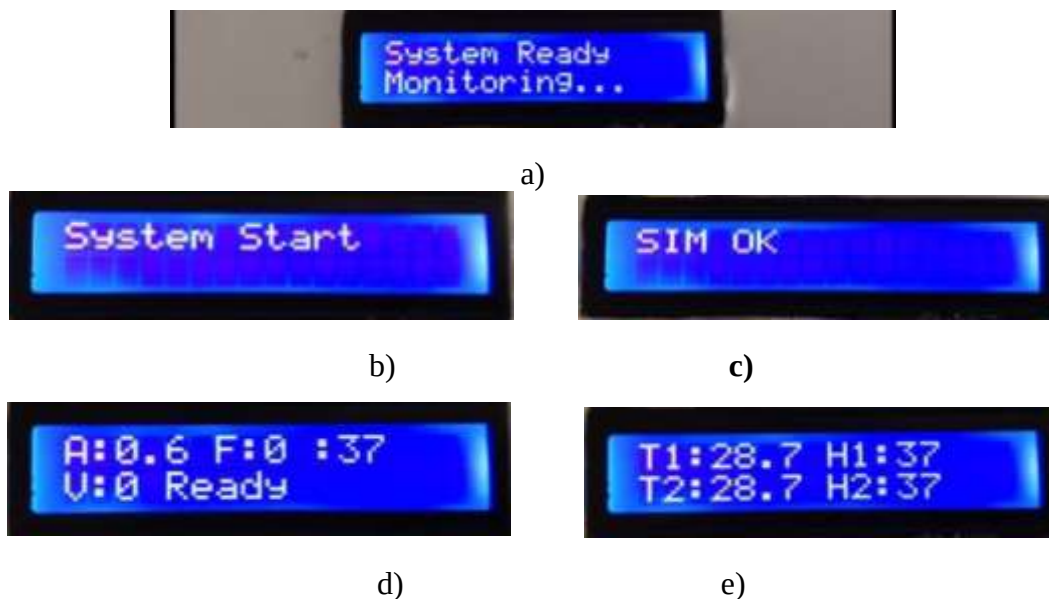


Figure III-39 : Initialisation du système, vérification du module GSM et affichage des mesures des capteurs sur l'écran LCD

Comme l'illustre la figure III-39 (b), Le message « **System Start** » signifie que le système est en cours d'initialisation. Pendant cette étape, le microcontrôleur active les différents modules et vérifie le fonctionnement des capteurs avant de passer automatiquement au mode de surveillance.

Comme le montre la figure III-39 (c), « **SIM OK** » signifie que la carte SIM est reconnue avec succès par le module GSM. Cette vérification confirme que le système est prêt à envoyer des alertes par SMS en cas de détection d'un événement sismique ou de l'apparition de fissures. Sur la figure III-39 (d), l'écran LCD affiche les mesures des trois capteurs en temps réel. « A » représente l'accéléromètre qui détecte les accélérations sismiques, « V » le capteur de vibration et « F » le capteur de fissure. Les valeurs affichées sont normales et le message « **Ready** » confirme que le système fonctionne correctement. En cas de dépassement des seuils programmés, une alerte est déclenchée et un SMS est envoyé via le module GSM

La figure III-39 (e) montre les mesures de température et d'humidité affichées sur l'écran LCD. Le système utilise deux capteurs DHT pour surveiller les conditions environnementales. Les valeurs « **T1 : 28.8 °C** » et « **T2 : 28.8 °C** » représentent les températures mesurées par les deux capteurs. Les valeurs « **H1 : 37 %** » et « **H2 : 37 %** » correspondent au taux d'humidité relative mesuré par chaque capteur. Ces mesures permettent de contrôler les conditions ambiantes autour de la structure et de vérifier que les capteurs fonctionnent correctement. Les données sont affichées en temps réel sur l'écran LCD et peuvent être exploitées pour assurer un suivi continu de l'environnement.

La figure III-40, présente les valeurs mesurées en temps réel par les deux capteurs ADXL affichées sur le moniteur série de l'Arduino IDE. Les composantes d'accélération selon les axes X, Y et Z sont affichées pour chaque capteur, ainsi que la magnitude des vibrations calculée par le système. Les résultats montrent que, durant cette phase de test, la magnitude reste égale à 0, indiquant l'absence de vibrations significatives, tandis que les variations observées sur les axes correspondent aux faibles fluctuations normales des capteurs au repos.



Figure III-40 : Affichage des données des capteurs ADXL sur le moniteur série.

III.11 Consommation énergétique

La consommation énergétique du système proposé a été évaluée à partir des caractéristiques électriques des différents composants électroniques utilisées, complétées par des mesures effectuées lors des essais expérimentaux. Le système est constitué d'une carte Arduino Mega 2560, de deux accéléromètres ADXL345, de deux capteurs de vibration SW-420, de deux jauges de contrainte BF350 associées aux modules HX711, de deux capteurs de température et d'humidité DHT11, d'un afficheur LCD, de deux LED de signalisation, d'un buzzer ainsi que d'un module de communication GSM SIM800L.

Les résultats montrent que le système présente une faible consommation électrique en fonctionnement normal, tandis qu'une augmentation temporaire de la consommation est observée lors de l'émission des SMS ou des appels d'alerte par le module GSM. Cette consommation reste compatible avec une alimentation continue en courant continu (12 V), ce qui rend le système adapté à une surveillance permanente des structures en béton armé situées dans les zones à risque sismique.

La faible consommation énergétique des composants retenus contribue à améliorer l'autonomie et la fiabilité du système, tout en garantissant une détection continue des vibrations sismiques et des fissures ainsi qu'une transmission rapide des alertes en cas de danger.

III.11.1 Puissance des différents composants

Tableau III-1 : Tableau de consommation

Composant	Tension de fonctionnement (V)	Courant typique (mA)	Puissance (W)
Arduino Mega 2560	5	70	0,35
ADXL345 ×2	3,3	0,3	0,001
SW420 ×2	5	30	0,15
HX711 ×2	5	3	0,015
DHT11 ×2	5	5	0,025
LCD 16×2	5	18	0,09
Module carte SD	5	50	0,250
LED Rouge + Verte	5	20	0,1
Buzzer (veille)	5	0	0
SIM800L (veille)	4,2	25	0,105
SOMME			1.086

Puissance totale utile :

D'après le théorème de Boucherot : $P_{Totale} = \sum P_i = 1.086 \text{ Watts}$

Pertes du convertisseur DC-DC (LM2596)

Le convertisseur alimente uniquement le SIM800L.

Puissance utile :

$$P_{SIM} = 4.2 \times 0.025 = 0.105 \text{ W}$$

Avec : $\eta = 90\%$

La puissance absorbée est :

$$P_{entree} = 0.105 / 0.90 = 0.117 \text{ W}$$

$$P_{pertes} = 0.117 - 0.105 = 0.012 \text{ W}$$

Pertes du régulateur LM7809

Supposons que le LM7809 alimente tous les circuits 5 V via un régulateur interne de l'Arduino.

Courant total traversant le LM7809 $\approx 170 \text{ mA}$

La perte est : $P = (12 - 9) \times 0.17 = 0.51 \text{ W}$.

Puissance totale absorbée :

$$P_{totale} = P_{utile} + P_{LM7809} + P_{DCDC} = 1.086 + 0.51 + 0.012 = 1.608 \text{ W}$$

Courant délivré par la source DC 12V/2A V

$$I = \frac{P}{V} = 0.134 \text{ A}$$

Soit : **134 mA**

Si le système envoie un SMS

$$I_{\text{SIM800L}} \approx 250 \text{ mA}$$

$$\text{Puissance utile : } P_u = 4.2 \times 0.25 = 1.05 \text{ W}$$

$$\text{Avec le rendement : } P = 1.05/0.90 = 1.17 \text{ W}$$

La puissance totale devient : $P_{\text{Totale}} = 2.66 \text{ W}$, Pendant quelques secondes.

Lors d'un appel GSM

$$\text{Courant} \approx 2 \text{ A}$$

$$\text{Puissance utile : } P_u = 4.2 \times 2 = 8.4 \text{ W}$$

$$\text{Puissance absorbée : } P = 8.4/0.90 = 9.33 \text{ W}$$

Puissance totale $\approx 10,8 \text{ W}$, Pendant quelques millisecondes.

III.12 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de concrétiser la transition entre les concepts théoriques et la réalisation pratique d'un système intelligent, économique et autonome de surveillance de la santé structurelle. Ce travail s'est articulé autour de deux volets complémentaires : d'une part, le volet Génie Civil, avec la fabrication précise d'éprouvettes en béton armé soumises à différentes conditions d'humidité, et d'autre part, le volet Électronique, marqué par la conception et la fabrication en laboratoire d'une carte personnalisée (PCB Shield) sous Proteus 8.

La phase de simulation et de validation finale a pleinement démontré l'efficacité du système. Les capteurs (SW-420, ADXL345 et jauges BF350-3AA) ont réagi avec précision aux secousses et aux microfissures, tandis que la carte Arduino Mega a orchestré avec succès les alertes locales ainsi que les notifications d'urgence à distance via le module GSM SIM800L, tout en archivant les données sur carte SD. Ce chapitre valide ainsi une approche interdisciplinaire réussie, offrant une solution concrète et fiable pour la protection des infrastructures face aux risques sismiques.

Conclusion générale

À l'issue de ce travail, nous pouvons affirmer que le projet a atteint ses objectifs principaux, à savoir la conception d'un système intelligent de détection sismique et de surveillance des fissures, basé sur la combinaison des techniques de l'électronique industrielle avec les concepts du génie civil.

Ce projet nous a permis de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises tout au long de notre formation, tout en explorant des domaines complémentaires. Sur le plan théorique, nous avons analysé le comportement dynamique des structures sous l'effet des charges sismiques, en nous intéressant particulièrement à la formation et à la propagation des fissures. Nous avons également étudié l'influence de ces défauts sur les propriétés mécaniques telles que la rigidité, l'amortissement et les fréquences naturelles. Par ailleurs, l'étude des différents modèles de fondation élastique (Winkler, Pasternak, visco-Pasternak) ainsi que des matériaux avancés, a permis d'enrichir notre compréhension des mécanismes de protection des structures.

En complément, nous avons passé en revue les technologies de capteurs, les systèmes d'acquisition de données et les réseaux de communication, ce qui nous a guidés dans le choix des composants adaptés à notre système. Sur le plan pratique, nous avons fabriqué des éprouvettes en béton armé au laboratoire, en suivant un protocole expérimental rigoureux incluant le dosage, le malaxage, le ferrailage, le coulage et le cure. Parallèlement, nous avons conçu un circuit imprimé personnalisé sous le logiciel Proteus, en passant par les étapes de schéma électronique, de routage des pistes et de visualisation 3D. La carte réalisée a ensuite été assemblée avec l'Arduino Mega 2560 et les capteurs sélectionnés (accéléromètre ADXL345, capteur de vibration SW420, capteur d'humidité DHT11, module GSM SIM800L, etc.). Les tests effectués ont montré que le système est capable de détecter les vibrations et les variations environnementales, et de déclencher des alertes via le buzzer et le module GSM lorsque les seuils définis sont dépassés. En définitive, ce projet a constitué une expérience riche et formatrice, alliant la théorie à la pratique. Il nous a permis de développer des compétences techniques en électronique, en programmation et en conception de circuits imprimés, tout en renforçant notre compréhension des problématiques du génie civil. Il ouvre également des perspectives intéressantes pour la poursuite de travaux dans le domaine de la surveillance intelligente des infrastructures.

Bien que les résultats obtenus soient satisfaisants, plusieurs **perspectives** d'amélioration peuvent être envisagées afin d'accroître les performances et les fonctionnalités du système.

- ✚ Il serait intéressant de remplacer le module de communication GSM SIM800L par des technologies de communication plus récentes, afin d'améliorer la couverture, la rapidité de transmission des alertes et la consommation énergétique.
- ✚ Une autre perspective consiste à développer une application mobile ou une interface Web permettant de visualiser en temps réel les mesures des différents capteurs, l'historique des événements ainsi que l'état général de la structure surveillée.
- ✚ Par ailleurs, l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle ou d'apprentissage automatique permettrait d'analyser les données, de reconnaître les caractéristiques des événements sismiques et de distinguer les vibrations normales des situations réellement dangereuses.
- ✚ Intégration d'une batterie de secours pour assurer le fonctionnement lors des coupures d'alimentation.

Bibliographie

- [1] Benadouda et al. *Propagation d'ondes dans poutres FGM avec porosités et fissures multiples*, 2025
- [2] Ghalem et al. *Poutres 2D-FG avec fissures internes sur fondation Winkler-Pasternak*, 2025.
- [3] Kehli et al. *Poutres FGM fissurées sur milieu viscoélastique (théorie quasi-3D)*, 2024.
- [4] Dahmane et al. *Poutres FGM bidirectionnelles poreuses et fissurées sur fondation Winkler*, 2024.
- [5] Latroch et al. *Identification de fissures inclinées dans poutres FGM sur fondation élastique*, 2023.
- [6] Laouche et al. *Poutres composites acier-béton polymère avec fissures (section caisson)*, 2025.
- [7] Salhi et al. *Béton caoutchouté (déchets de pneus) - étude expérimentale et analytique*, 2024.
- [8] Safer et al. *Béton avec vase calcinée (sédiments de dragage) - attaque acide*, 2025.
- [9] Bourouis et al. *Propagation d'ondes dans poutres FGM multidirectionnelles sous effet thermique*, 2025.
- [10] Zhu, Z., Yang, J., Wen, C.-K., Xia, S., & Jin, S. *An overview of multi-modal sensing systems and the potential of ISAC technologies in SHM. Journal of Building Engineering*, 2025.
- [11] Oliveira, V. P. d., Reis, A., & Salvador Filho, J. A. A. *Assessing the Evolution of Structural Health Monitoring through Smart Sensor Integration. Procedia Structural Integrity*, 64, 653–660. Elsevier BV, 2024.
- [12] Zhang, B., Ren, Y., He, S., & Gao, Z. *A review of methods and applications in structural health monitoring (SHM) for bridges. Measurement*, 245, 116575, 2025.
- [13] Jayawickrema U.M.N., Herath H.M.C.M., Hettiarachchi N.K., Sooriyaarachchi H.P., Epaarachchi J.A, *Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: A review. Measurement*, 199, 111543, 2022.
- [14] Zhu, H., Sharif Khodaei, Z., & Aliabadi, F.M.H, *Appraisal of linear baseline-free techniques for guided wave based structural health monitoring. Ultrasonics*, 2024, 144, 107445
- [15] He, Z., Li, W., Salehi, H., Zhang, H., Zhou, H., & Jiao, P, *Integrated structural health monitoring in bridge engineering. Automation in Construction*, 136, 01209, 2022.
- [16] Young-Jin Cha, Rahmat Ali, John Lewis, Oral Büyüköztürk. *Deep learning-based structural health monitoring. Automation in Construction*. 161. 2024.
- [17] *Design of laboratory multi-point temperature and humidity alarm system based on DHT11. Electronic Engineering World*, 2011.

- [18] Gunturi, M, *Application of Internet of Things in Field of Civil Engineering*. International Journal of Innovative Research in Technology (IJIRT), 2021.
- [19] Seeed Studio Wiki. *Grove - Vibration Sensor (SW-420) Documentation*, 2023.
- [20] GitHub. *Grove-Vibration Sensor SW-420 Technical Documentation*, 2018.
- [21] Analog Devices. *ADXL345 Datasheet: 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer*.
- [22] Analog Devices Wiki. *ADXL345 Applications*, 2012.
- [23] Singh, S., Sachan, A.K., & Shanker, R, *A review on smart aggregate based structural health monitoring*. *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [24] Badamasi, Y. A, *The working principle of an Arduino*. International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2014.
- [25] Lynch, J. P, *A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring*. *Shock and Vibration Digest*, 2007.
- [26] Analog Devices, *ADXL345: 3-Axis Digital Accelerometer Datasheet*. Technical Report, 2025.
- [27] Gupta, S., & Jha, A, *Sensor-based Seismic Monitoring Systems for Building Safety*. International Journal of Engineering Research, 2020.
- [28] Mouser Electronics. *Electronic Component Power Management - Technical Specifications*. Technical Documentation, 2015.
- [29] Farrar, C. R., & Worden, K, *An introduction to structural health monitoring*. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2007.
- [30] SIMCom Wireless Solutions, *SIM800L Hardware Design & AT Command Manual*. Official Documentation, 2016.
- [31] Texas Instruments, *LM78XX Series Voltage Regulators Datasheet*, Revised 2020.

Résumé :

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un système intelligent de détection sismique et de surveillance des fissures pour la protection des structures. L'objectif est de proposer une solution autonome et fiable, capable de détecter en temps réel les vibrations sismiques et les fissures dans le béton armé. Le travail est structuré en trois points : analyse du comportement dynamique des structures, étude des technologies de détection (capteurs MEMS, GSM, acquisition de données), et réalisation expérimentale incluant la fabrication d'éprouvettes en béton armé, la conception d'un PCB, et l'intégration d'un Arduino Mega 2560 avec déclenche des alertes locales (Buzzer, LED) et des notifications à distance (SMS, appel) via GSM.

Mots-clés : Détection sismique, surveillance des fissures, Arduino Mega, capteurs MEMS, GSM, PCB, béton armé.

الملخص :

تقدم هذه المذكرة تصميم وتحقيقاً تجريبياً لنظام ذكي للكشف الزلزالي ومراقبة الشقوق، يهدف إلى توفير حل مستقل وموثوق للكشف الفوري عن الاهتزازات الزلزالية والتشققات في الخرسانة المسلحة. يتكون العمل من ثلاثة فصول: تحليل السلوك الديناميكي للمنشآت، دراسة تقنيات الكشف (حساسات MEMS ، GSM)، والتحقيق التجريبي الذي يشمل صنع عينات خرسانية، تصميم دائرة مطبوعة ، ودمج Arduino Mega 2560 مع حساسات ADXL345 ، SW420 ، DHT11 ، BF350-3AA ووحدة GSM SIM800L أظهرت النتائج أن النظام يكشف الاهتزازات والتشوهات بشكل فعال، ويطلق تنبيهات محلية ، وإشعارات عن بُعد (رسالة، مكالمة) عبر GSM .

الكلمات المفتاحية : كشف زلزالي، مراقبة شقوق، Arduino Mega، حساسات MEMS ، GSM، دائرة مطبوعة، خرسانة مسلحة.

Abstract :

This thesis presents the design and validation of an intelligent system for seismic detection and crack monitoring. The aim is to provide an autonomous and reliable solution for real-time detection of seismic vibrations and cracks in reinforced concrete. The work is organized into three chapters: dynamic behavior analysis of structures, detection technologies (MEMS sensors, GSM), and experimental implementation including reinforced concrete specimen manufacturing, PCB design, and integration of Arduino Mega 2560 with sensors (ADXL345, SW420, DHT11, BF350-3AA) and a SIM800L GSM module. Results show that the system effectively detects vibrations and deformations, and triggers local alerts (buzzer, LED) and remote notifications (SMS, call) via GSM.

Keywords: Seismic detection, crack monitoring, Arduino Mega, MEMS sensors, GSM, PCB, reinforced concrete.