



UNIVERSITE LILLE1

ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Thèse de Doctorat

Micro et nanotechnologie, acoustique et télécommunications

Présentée et soutenue par

Amal Abbadi

Le 23 Septembre 2015

**Développement des réseaux de capteurs sans fil noyés dans le
béton pour la surveillance des ouvrages de Génie Civil**

Président :	T. LASRI	Professeur - Université de Lille 1
Rapporteurs :	X. DEROBERT O. LAFOND	HDR –Ingénieur, Ifsttar - Nantes HDR –Maitre de conférences Université de Rennes
Examineurs :	H. BIAN C. GHARBI P. MARIAGE	Maitre de conférences - Université de Lorraine Directeur du CITC_EuraRFID - Lille Maitre de conférences - Université de Lille 1

Directeur de Thèse : Nathalie Rolland

Institut de recherche des composants logiciels et matériels pour l'information et la communication avancée IRCICA Villeneuve d'Ascq

Co-Directeur de Thèse : Isam Shahrour

Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCGE) Villeneuve d'Ascq

Titre:

Développement des réseaux de capteurs sans fil noyés dans le béton
pour la surveillance des ouvrages de génie civil

Résumé :

L'objectif de ce mémoire de thèse est de mener des recherches sur l'utilisation des technologies sans contact pour la surveillance de santé structurale. Les recherches comportent des développements scientifiques et technologiques visant à bien comprendre le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil dans un milieu hétérogène.

Tout d'abord, nos études se concentrent sur les mesures des coefficients de réflexion et de transmission des ondes électromagnétiques dans le béton. Ensuite, la réalisation d'une communication entre deux antennes patch noyées dans du béton a permis de confirmer l'effet de l'humidité du béton sur l'atténuation des ondes radio dans le béton. Cette analyse a conduit à l'identification des propriétés diélectriques du béton pour la fréquence 860 MHz.

Enfin, nous avons étudié l'influence des configurations des armatures du béton (emplacement des armatures, dimensions des armatures) sur les coefficients de réflexion et de transmission. Nous avons étudié et optimisé une topologie de réseaux de capteurs sans fil adéquate pour être noyée dans le béton armé. L'étude d'optimisation prend en compte les caractéristiques des nœuds de capteurs, le bilan de liaison entre un nœud de capteur communicant et le puits et la durée de vie d'un nœud.

Title:

Developments of wireless sensor networks embedded in concrete for monitoring civil engineering structures

Abstract:

The objective of this thesis is to conduct research on the use of contactless technologies for structural health monitoring. The research involves scientific and technological developments to understand the functioning of wireless sensor networks in a heterogeneous environment composed of cement, aggregates, water and frames.

First, our studies focus on reflection and transmission coefficients measurements of electromagnetic waves in the concrete. Then, the realization of a communication between two Patch antennas embedded in concrete confirmed concrete moisture effect on radio waves attenuation. This analysis led to the identification of the dielectric properties of concrete at 860 MHz frequency.

Finally, we studied the effect of various reinforced bar configurations on reflection and transmission coefficients. Then we studied and optimized a wireless sensor network topology to be embedded in concrete. The optimization takes into account the characteristics of sensor nodes, link budget between the communicating sensor node and the gateway and the lifespan of a node.

Mots-clés:

Réseaux de capteurs sans fil, antennes, béton, permittivité, Surveillance de santé structurale, Capteur de déformation, Mesures de température et d'humidité, Atténuation onde électromagnétique.

Remerciement

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leurs aides et qui ont contribué à son aboutissement. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre deux laboratoires : Institut de recherche des composants logiciels et matériels pour l'information et la communication avancée (IRCICA) et laboratoire génie civil et géo-environnement (LGCgE). J'ai ainsi eu la chance d'avoir deux encadrant : Nathalie Rolland et Isam Shahrour. Merci à eux de m'avoir apporté les connaissances liées à leurs domaines d'expertise, d'avoir été disponibles, bienveillants et toujours exigeants.

Ces travaux de thèse ont été soutenus, le 23 septembre 2015, devant un jury composés de deux rapporteurs, Xavier Derobert et Olivier Lafond, de trois examinateurs, Philippe Mariage, Hanbing Bian et Chekib Gharbi, et de mes encadrants. Je les remercie, d'avoir consacré de leur temps à la lecture du manuscrit, et de m'avoir fait des retours constructifs, que j'ai pu intégrer dans sa version finale. J'exprime ma profond gratitude à Tuami Lasri d'avoir accepté de présider la soutenance et à l'ensemble des membres du jury pour les éléments échangés à la suite de la présentation.

Je voudrais remercier les membres du groupe CSAM pour leurs accueils, leurs sympathies, et leurs grandes compétences techniques dont j'ai pu bénéficier pour mes travaux, tout particulièrement Redha Kassi, Bernard Verbeke, Christophe Loyer, Laurent Clavier, Alexandre boé, Phillippe Mariage, Rémy Bernard, Aymeric Pastre, Kamel Guerchouche, Xin Yan, Igual Roman, Viktor Toldov, etc. Au sein de l'IRCICA, je voudrais saluer toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler et échanger, tout particulièrement, Peggy Stankowski, Ahmed Ben-Abdeslam, Michel Soulage et Gilles Cousquer.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du CITC-EuraRFID tout particulièrement, Chekib Gharbi et Thierry Demol, à qui j'exprime mes sincères reconnaissances.

A vous mes parents, je dis un immense merci. Je vous suis infiniment reconnaissant pour votre soutien et vos encouragements. Je remercie également mon frère et mes sœurs qui m'ont toujours encouragé et supporté moralement.

Table des matières

Introduction générale	6
Chapitre 1. Réseaux de Capteurs Sans Fil pour SHM	8
I. Introduction	10
II. Réseau de capteurs sans fil.....	12
II.1 Introduction.....	12
II.2 Nœud de capteur	12
II.2.1. Capteur	13
II.2.2. Contrôleur	13
II.2.3. Mémoire	13
II.2.4. Dispositif de communication	14
II.2.5. Alimentation.....	14
III. Verrous technologiques des réseaux de capteurs sans fil pour la SHM	15
III.1 Système évolutif	15
III.2 Sécurité.....	15
III.3 Encapsulation	16
III.4 Durée de vie du nœud et du réseau de capteurs	16
III.4.1. Solutions logicielles.....	17
III.4.2. Solutions matérielles.....	17
III.5 Canaux de propagation.....	18
IV. Quelques exemples de projets utilisant des capteurs sans fil pour la surveillance des structures de génie civil.....	19
V. Conclusion	34

Chapitre 2. Propriétés Électromagnétiques du béton	36
I. Introduction	39
II. Propriétés Électromagnétiques d'un matériau	39
II.1. Définitions	39
II.1.1. Définitions de la permittivité complexe	39
II.1.2. Définitions de la perméabilité	40
II.1.3. Conductivité électrique	40
II.2. Propriétés Électromagnétiques du béton	40
II.2.1. Atténuation de la propagation de l'onde électromagnétique en fonction de la fréquence	41
II.2.2. Humidité au sein du béton	42
II.2.3. Armature métallique dans le béton	43
II.2.4. Hétérogénéité du béton	44
III. Techniques de caractérisation de la constante de permittivité relative du béton	45
III.1. Méthode basée sur la mesure de la capacité à plan parallèle	46
III.2. Méthode en cavité résonnante	47
III.3. Mesure en propagation guidée	48
III.4. Mesure par sonde coaxiale	49
III.5. Méthode de mesure en espace libre	50
III.6. Récapitulatif des différentes techniques	51
IV. Choix de la fréquence d'émission des capteurs noyés dans le béton	53
V. Caractérisation du béton à partir de l'étude d'une transmission entre deux antennes noyées dans le béton	53
V.1. Choix de l'antenne pour le banc de caractérisation des propriétés électromagnétiques du béton	54
V.1.1. Définition d'une antenne	54
V.1.2. Caractéristiques d'une antenne	54
V.1.2.1. Diagramme de rayonnement en champ lointain	55
V.1.2.2. Directivité	56

V.1.2.3. Rendement	56
V.1.2.4. Gain.....	56
V.1.2.5. Polarisation	57
V.1.2.6. Régions du champ d'une antenne	57
V.1.3. Choix de l'antenne Planaire	58
V.1.4. Antenne Patch	61
V.1.4.1. Structure	61
V.1.4.2. Alimentation d'antenne	62
V.1.4.3. Conception de l'antenne patch	63
V.2. Banc de mesure des caractéristiques électriques du béton	65
V.2.1. Etude de l'influence du Boitier d'air	66
V.2.2. Etude l'influence du type de béton	67
V.2.3. Conception d'une antenne patch noyée dans du béton	70
V.2.4. Réalisation des antennes patch.....	72
V.3. Caractérisation électrique du béton	75
VI. Influence des armatures	77
VI.1. Positionnement des armatures.....	77
VI.2. Dimension des grilles métalliques	79
VI.3. Diamètre des fer-rond	80
VII. Conclusions	81
Chapitre 3. Configuration Réseau de Capteur Sans Fil.....	83
I. Introduction	85
II. Choix de la topologie du réseau de capteurs noyé dans le béton	85
II.1. Calcul de la portée d'une communication radio entre des nœuds de capteur noyé dans du béton	87
II.2. Choix de la topologie du réseau de capteur et de l'antenne du nœud de capteur	91
II.3. Simulation des réseaux d'antennes	95
III. Consommation et durée de vie des nœuds de capteurs	97

IV. Etudes des différents capteurs pour étudier les déformations de l'édifice en béton	102
IV.1. Déformations et contraintes	102
IV.1.1. Définitions	102
IV.1.2. Tenseur des contraintes, tenseur des déformations	103
IV.2. Etat de l'art des capteurs de déformation	105
IV.2.1. Les capteurs à cordes vibrante	105
IV.2.2. Les capteurs à fibre optique	106
IV.2.3. Les jauges de contraintes	107
IV.2.3.1. Principe	107
IV.2.3.2. Montage de pont de Wheatstone	108
IV.2.3.3. Exigences de courant pour des configurations de jauge	111
IV.2.4. Récapitulatif des performances des capteurs de déformation	112
V. Capteurs de température et d'humidité du béton	114
V.1. Température et humidité internes du béton	114
V.2. Conception de la boîte d'encapsulation	114
V.3. Mesure de la température et de l'humidité du béton	116
VI. Réseau de capteurs noyés dans un édifice « Totem » en béton armé	118
VI.1. Introduction	118
VI.2. Etude de l'influence de la taille des capteurs sur une structure en béton	119
VI.2.1. Contrainte équivalente de Von Mises	119
VI.2.2. Modèle de simulation	120
VI.2.3. Etude de l'influence de la taille des capteurs	121
VI.3. Dimensionnement de la structure en béton armé « TOTEM »	122
VI.3.1. Introduction	122
VI.3.2. Modes de fondations des ouvrages de génie civil	123
VI.3.3. Influence des terrains sur le choix des fondations	123
VI.3.4. Méthode de réseau	125

VI.3.4.1. Généralités	125
VI.3.4.1. Calcul du massif pour la structure « TOTEM »	126
VI.4. Evaluation des mesures	128
VII. Conclusions	128
Conclusions générales et perspectives	129

Introduction générale

Depuis quelques décennies, le développement de nouvelles techniques pour la surveillance et l'analyse du vieillissement des ouvrages est devenu primordial. Grâce aux progrès des technologies sans contact, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) offrent de nouvelles possibilités pour fournir des informations sur l'état actuel des structures.

Un réseau de capteurs sans fil est constitué d'un nombre de nœuds communiquant qui stockent, traitent et acheminent des données mesurées telles que la température, l'humidité et la déformation via des transmissions radio. Toutefois, il soulève de nombreuses problématiques concernant les ressources limitées en énergie, la transmission radio dans le béton, la sécurité de l'information, l'intégration dans la structure, etc.

Cette thèse s'inscrit dans un ensemble de travaux de recherche pluridisciplinaires sur la ville intelligente « Smart City », connectée et durable. Elle se déroule entre deux laboratoires de recherche qui visent à réunir leurs compétences et leurs savoirs faire dans les domaines de l'Electronique et du Génie Civil.

- LGCgE, laboratoire Génie Civil et géo-Environnement.
- IRCICA, Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée.

Cette thèse vise à réaliser un système de Surveillance de Santé Structurale « SHM » autonome employant des réseaux de capteurs sans fil noyé dans le béton. Ce système doit être étudié en considérant à la fois les caractéristiques des capteurs et les structures à surveiller. Nos travaux intitulés « développement des réseaux de capteurs sans fil enfouis dans le béton pour la surveillance des ouvrages de génie civil » consiste à étudier précisément le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil dans le béton qui est un milieu hétérogène composé de ciment, granulats, eau et armatures.

Nous présentons dans le premier chapitre les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication et leurs applications dans le domaine du génie civil. Dans le deuxième chapitre les techniques de caractérisation du béton sont présentées ainsi que les paramètres influant sur les propriétés diélectriques du béton. Nous présentons la mise en œuvre d'un banc de mesure qui nous a permis de caractériser précisément la permittivité diélectrique du béton. Nous avons de plus mesuré l'évolution de l'humidité au sein béton et déterminé l'influence des configurations des armatures (positionnement des armatures, dimensions des grilles, diamètres des fer-ronds.) sur les coefficients de réflexion et de transmission. Cette étude nous aidera à déterminer la position de l'antenne vis-à-vis des armatures dans le la structure en béton armé.

Dans le troisième chapitre après une étude des différentes topologies de réseaux de capteurs, nous avons configuré une topologie de réseaux de capteurs qui est optimisée pour être noyée dans le béton. Ce choix de topologie est déterminé à partir des caractéristiques des nœuds de capteurs, du bilan de liaison entre un nœud de capteur communicant et le puits et la durée de vie d'un nœud. Nous réalisons un dispositif composé d'un capteur de température et d'humidité communicant sans fil noyé dans le béton afin d'étudier l'évolution de la température et de l'humidité internes du béton en fonction du temps. Enfin, un démonstrateur constitué d'un Totem en béton armé de 3 m dans lequel sont noyés 6 nœuds de capteurs communicant sans fil pouvant mesurer la température, l'humidité et les contraintes de déformation de cette structure sous l'effet du vent est réalisé afin de valider nos études théoriques.

Chapitre 1

Réseau de Capteurs Sans Fil pour SHM

Sommaire :

I. Introduction	10
II. Réseau de capteurs sans fil.....	12
II.1 Introduction.....	12
II.2 Nœud de capteur	12
II.2.1. Capteur	13
II.2.2. Contrôleur	13
II.2.3. Mémoire	13
II.2.4. Dispositif de communication	14
II.2.5. Alimentation.....	14
III. Verrous technologiques des réseaux de capteurs sans fil pour la SHM	15
III.1 Système évolutif	15
III.2 Sécurité.....	15
III.3 Encapsulation	16
III.4 Durée de vie du nœud et du réseau de capteurs	16
III.4.1. Solutions logicielles	17

III.4.2. Solutions matérielles.....	17
III.5 Canaux de propagation.....	18
IV. Quelques exemples de projets utilisant des capteurs sans fil pour la surveillance des structures de génie civil.....	19
V. Conclusion	34

I. Introduction:

Le vieillissement et la dégradation des ouvrages de génie civil posent des problèmes de sécurité très graves, surtout avec l'utilisation accrue de ces structures. Les charges de services, les paramètres environnants et les actions accidentelles peuvent endommager les structures. On notera sur la figure 1, l'effondrement d'un pont dû à une construction insuffisamment contrôlée [2].



Figure 1 .1: Effondrement du pont d'Injaka (Afrique du sud), en juillet 1998 [2].

Jusqu'à présent, le suivi des structures a été largement basé sur l'inspection visuelle ainsi que sur les méthodes non destructives qui sont faciles à mettre en œuvre mais ne détectent que les imperfections sur la surface des ouvrages. Ces techniques sont incapables de fournir suffisamment d'informations pour comprendre comment les dégradations locales affectent la performance de la structure dans sa globalité.

Afin d'améliorer l'évaluation de la performance de ces ouvrages, ou à défaut d'en avoir une vision objective et correcte, il est important de pouvoir caractériser le comportement réel de la structure. Ce processus d'évaluation et de surveillance en temps réel ou à intervalles réguliers de l'intégrité des structure est le principe même de ce que l'on appelle la surveillance de santé structurale, Structural Health Monitoring (SHM) [1]. Suivant les techniques d'analyse et de traitement des données, la surveillance de santé structurale permet d'accéder à 4 niveaux d'information [3]:

- Détection de défaut,
- Localisation de défaut,
- Quantification du défaut,
- Anticipation et prédiction de défaut.

Les systèmes SHM peuvent être intégrés dès la conception des structures, ou ajoutés après dans le but d'augmenter la durée de vie des ouvrages. Il est noté que même des structures récentes peuvent présenter des défauts de mise en œuvre ou subir des événements extrêmes, pouvant entraîner l'apparition de dégradations.

L'un des défis majeurs des systèmes SHM est de développer un système de maintenance dont la durée de vie est supérieure à celle de la structure surveillée. L'objectif est de déterminer un ensemble de données (des grandeurs physiques) qui, archivées et traitées, permettront de comprendre le comportement de la structure. De nombreuses études de systèmes SHM ont déjà montré la capacité des capteurs à détecter, localiser et quantifier un défaut de structure en temps réel. Le choix de la technologie des capteurs pour un système de SHM doit répondre aux spécifications suivantes [4] :

- Grande sensibilité à la présence d'un endommagement.
- Faible sensibilité par rapport aux conditions environnementales de la structure,
- Intrusion minimale sur la structure : Taille, poids, câblage électrique,
- Un rapport coût fiabilité optimal.

Néanmoins la nécessité de câbler les capteurs (à la fois pour la collecte d'informations et pour l'alimentation électrique) est une contrainte pénalisante pour les systèmes de SHM due aux nombreuses limitations des systèmes filaires traditionnels. On peut citer [5] :

- Le coût important du câblage qui peut atteindre 14 à 16 % du budget.
- Le coût d'installation et de maintenance élevé.
- La limitation du nombre de capteurs.
- La fatigue, corrosion et étanchéité des câbles.

L'objectif principal de l'approche SHM est le développement de systèmes de maintenance autonomes capables de détecter en temps réel les dégradations d'une structure afin de permettre une maintenance optimale. Les récentes avancées dans les technologies sans fil ont ouvert de nouveaux horizons en termes de détection des défauts. On s'est ainsi affranchi de la contrainte de câblage, qui limitait considérablement le déploiement d'un grand nombre de nœuds.

II. Réseau de capteurs sans fil:

II.1. Introduction :

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un ensemble de dispositifs, nommés nœuds de capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, appelé puits, à l'aide d'une connexion sans fil [6]. Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau (via Internet, satellite ou un autre système). L'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau par le biais du nœud puits (comme illustré sur la figure 1.2).

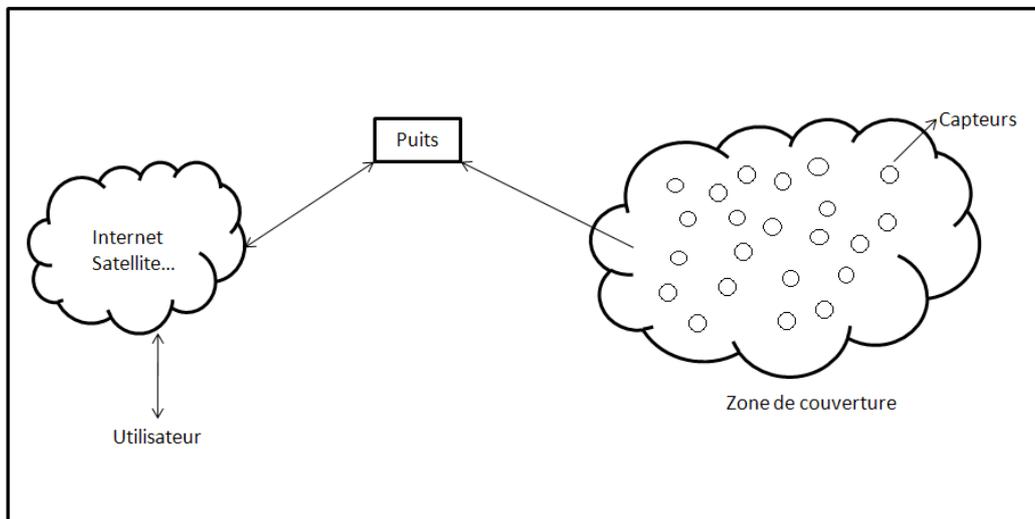


Figure 1.2: Exemple d'architecture d'un réseau de capteurs sans fil

II.2. Nœud de capteurs:

Un nœud de capteur sans fil permet de mesurer des grandeurs physiques (température, humidité, déformation, vibration...) afin d'évaluer ou contrôler l'environnement, de communiquer avec d'autres entités (puits ou autres nœuds) via un médium radio [7]. Un nœud de capteur est composé de cinq éléments principaux comme illustré sur la figure 1.3.

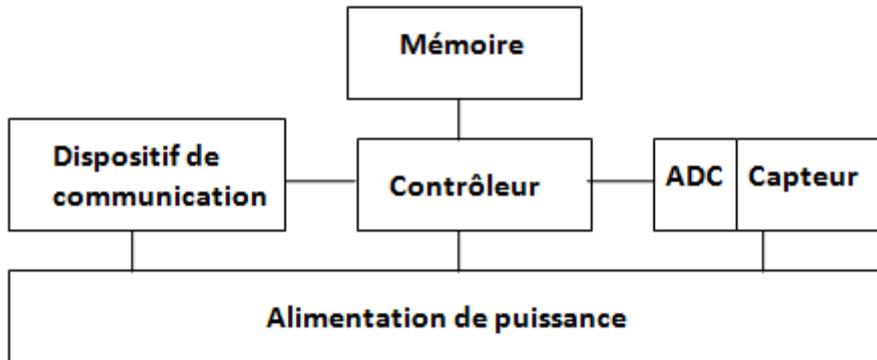


Figure 1.3: les composants d'un nœud de capteurs.

II.2.1. Capteur :

Cette unité permet de prélever l'information de l'environnement local et de la convertir en un signal numérique. Elle est composée d'un capteur qui prélève l'information de l'environnement local et d'un convertisseur Analogique/Numérique appelé ADC (Analog to Digital Converter) qui va convertir l'information analogique provenant du capteur et la transmettre à l'unité de traitement.

II.2.2. Contrôleur :

Cette partie reçoit les données provenant des capteurs, traite ces données (dates, ADC,...) et gère la mise en œuvre des protocoles de communication. Elle traite aussi les paquets provenant des nœuds voisins et met en œuvre les algorithmes de la couche MAC (Media Access Control). Ce traitement est la plupart du temps réalisé avec des microcontrôleurs qui présentent une faible consommation, une bonne flexibilité et la capacité à fonctionner dans des modes de consommation réduite [8].

II.2.3. Mémoire :

Plusieurs types de mémoires sont nécessaires au fonctionnement d'un nœud pour stocker les données et les programmes.

- Une mémoire de type RAM (Random Access Memory) permet le stockage des données temporaires reçues par le capteur et les paquets issus des nœuds voisins.

- Une mémoire de type ROM (Read Only Memory) permet le maintient du code des programmes.
- Une mémoire FLASH moins couteuse en énergie permet le stockage temporaire des données qui proviennent de la RAM si l'espace est insuffisant dans cette dernière ou si une coupure d'alimentation est produite.

II.2.4. Dispositif de communication :

Ce dispositif est responsable de toutes les émissions et réceptions de données entre les différents nœuds du réseau via un support de communication sans fil [8,9]. Les différentes techniques de communication sont les liens radio, fibre optique et ultrason.

Le choix du lien de communication s'effectue en fonction des applications. Pour beaucoup d'entre elles la communication Radio Fréquence (RF) est plus appropriée car elle n'a pas besoin de visibilité directe LOS (Ligne Of Sight) entre l'émetteur et le récepteur comparée à la communication optique.

Les performances d'un système de communication sont conditionnées par la couche physique implémentée. Elles dépendent de la bande de fréquence utilisée, du niveau de puissance d'émission, de la portée de transmission, du type de modulation et du niveau de consommation. La portée de transmission est dépendante de la puissance maximale de transmission, des caractéristiques de l'antenne et de l'atténuation causée par l'environnement.

II.2.5. Alimentation:

L'alimentation d'un nœud de capteurs est généralement assurée par une batterie. Elle doit avoir une grande capacité avec un poids minimum et une taille réduite. Sa capacité en charge doit résister à différents usages car un nœud peut consommer différents niveaux de puissance et avoir besoin d'un courant différent selon son mode de fonctionnement. Son autodécharge doit être la plus lente possible pour espérer une durée de vie la plus longue possible. Cependant, d'autres solutions sont envisageables comme l'utilisation de micro-batterie associée à un ou des systèmes de récupération d'énergie afin d'accroître l'autonomie du nœud de capteur.

Si la consommation est très faible on pourra utiliser une super capacité associée à un système de récupération d'énergie. Le système de récupération d'énergie sera fonction de l'application du réseau de capteurs [cf. chap.3].

III. Verrous technologiques des réseaux de capteurs sans fil pour la SHM :

Les nouveaux systèmes d'acquisition basés sur des réseaux de capteurs sans fil, sont le fruit du développement conjoint des technologies sans fil de ces dernières années et de la miniaturisation des architectures électroniques. Le but dans ces travaux de thèse est de concevoir un réseau de capteurs qui soit capable de répondre aux exigences de surveillance de santé structurale. Cependant, les solutions envisagées pour cela sont conditionnées par des contraintes qui varient entre conception de logiciels et développement de matériel. On peut énumérer certaines de ces contraintes comme suit:

III.1. Système évolutif:

Une structure peut changer de forme et complexité dans son vieillissement. Les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à un manque d'énergie. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption [10].

Un réseau de capteur doit offrir une grande souplesse pour adapter les politiques de déploiement pour les diverses situations à l'avenir. Le besoin de haute flexibilité requiert le développement d'algorithmes avancés pour contrôler le système.

III.2. Sécurité:

Comme les nœuds sont dispersés dans une zone publique et ouverte, ils doivent être capables de maintenir privées les informations qu'ils recueillent. La sécurité des données dans les réseaux de capteurs pour la SHM est indispensable. Ceci consiste à concevoir des protocoles pour assurer la sécurité des communications. En général, les besoins primaires à considérer en implémentant la sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil sont [11] :

- L'authentification : Vérifier l'identité des nœuds communiquant.
- La confidentialité : Interdire la révélation non autorisée d'informations.

- L'intégrité : Détecter toutes modifications, insertions, duplications ou suppressions d'informations qui auraient été opérées sur les données transmises.
- La non-répudiation : Un ensemble de processus, règles et mécanismes permettant d'associer un paquet à sa source.
- L'anonymat : Prévenir la révélation de l'identité d'un nœud qui a performé une action à l'intérieur du réseau.
- La localisation : Garder privé l'emplacement physique des capteurs.

III.3. Encapsulation:

Afin d'atteindre une grande fiabilité et facilité de maintenance, les réseaux de capteurs sans fil sont confrontés à de nombreux défis dont l'encapsulation fait partie:

- Les nœuds de capteurs d'un système SHM doivent être de petite taille pour faciliter l'installation.
- Le capteur doit être monté de telle manière qu'il fera partie de la structure d'origine, sans effet secondaire de l'élément hôte. Le matériau hôte dans lequel on souhaite intégrer des capteurs est un matériau chimiquement agressif : le béton ou le ciment avec des $\text{pH} > 12$. Un contact direct entre le matériau et les composants conduirait à des problèmes de corrosion et de diffusion de moisissures dans le système.
- Le boîtier doit protéger les composants électroniques internes des conditions environnementales difficiles et des interférences radio [12]. La définition et la spécification du packaging approprié est un véritable défi car il faut prendre en compte la compatibilité de l'interface entre le matériau support et le matériau du packaging tout en s'assurant que le packaging n'altère pas les performances du nœud capteur au niveau de l'information de l'environnement (exemple mesure de l'humidité) et au niveau de la communication (lien radio).

III.4. Durée de vie du nœud et du réseau de capteurs:

La durée de vie est un élément essentiel pour tout réseau de capteurs sans fil surtout pour l'application SHM. Il faut que le réseau de capteurs possède une durée de vie supérieure à l'édifice monitoré, c'est-à-dire supérieur à 100 ans. Le principal facteur limitant la durée de vie d'un réseau de capteurs est l'énergie [13].

En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si la perte des nœuds est très importante car ceci engendre des pertes de données. Par exemple, dans le cas où les nœuds du réseau peuvent être utilisés pour acheminer les informations d'autres nœuds au puits. Une perte trop grande de nœuds peut provoquer une rupture du routage de l'information.

Donc il est important que les batteries (sources d'énergie du nœud) durent le plus longtemps possible, étant donné que dans notre application, il est impossible de les changer. Pour cela il faut réaliser une optimisation conjointe au niveau des différentes parties du nœud de capteur pour que la consommation globale du nœud seul et au sein du réseau soit la minimale et que la source d'énergie puisse répondre à ces besoins tout en gardant des dimensions en adéquation du nœud de capteur.

Plusieurs solutions, à la fois logicielles et matérielles, ont été proposées afin d'optimiser la consommation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau de capteurs [14]. Parmi ces solutions, on peut citer :

III.4.1. Solutions logicielles :

Le réseau de capteurs sans fil doit s'adapter à l'environnement dans lequel il se trouve et aux changements imprévus comme l'épuisement et la perte d'un nœud. Ainsi, il est nécessaire de décentraliser le système sans fil et de faire acheminer l'information des capteurs à la station de base en employant des protocoles de communication multi-sauts. Le principal avantage des techniques multi-sauts est l'efficacité de puissance d'émission. Les données sont envoyées aux nœuds les plus proches et pas nécessairement à la station de base ce qui réduit la consommation globale du réseau et le risque d'inférence [cf. chap. 3].

III.4.2. Solutions matérielles :

La diminution de la consommation électrique des différents éléments d'un nœud (capteur, électronique d'acquisition, de stockage et de transmission des données) qui a d'abord permis l'alimentation de ces capteurs temporairement autonomes par des réservoirs électrochimiques finis (batteries, piles, super condensateurs), a désormais rendu envisageable d'alimenter le système en captant l'énergie disponible de son environnement immédiat. Cependant, la disponibilité de l'énergie est alors limitée par des contraintes physiques.

Les sources de récupération d'énergie ne sont caractérisées que par leur densité de puissance. Elles sont un moyen de capturer l'énergie ambiante comme la lumière, les flux thermiques et électromagnétiques ou l'énergie mécanique résultant de vibrations, charges ou contraintes. Cette énergie doit alors être efficacement convertie en puissance électrique utilisable.

Le principal avantage de la récupération d'énergie est la continuité de l'alimentation électrique : en théorie, elle dure tant qu'il y a de l'énergie dans l'environnement.

Parmi les technologies de récupération d'énergie les plus populaires ; on retrouve l'utilisation des micro-turbines éoliennes pour alimenter des capteurs sans fil sur un pont [15], et aussi l'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les nœuds de capteurs à distance. Malheureusement, Ces deux solutions ne peuvent être appliquées pour des capteurs noyés dans le béton.

En revanche, d'autres solutions ont été étudiées comme ; la récolte des vibrations générée par la circulation automobile sur un pont pour les convertir en énergie électrique utilisable pour alimenter le système de capteurs sans fil [16]. Des solutions d'énergies hybrides qui utilisent des transducteurs piézoélectriques et thermoélectriques. Deux sources d'énergie ambiante ont été considérées : les vibrations résiduelles d'un pont et les gradients thermiques qui se développent entre la surface du pont et l'air environnant [17].

III.5. Canaux de propagation :

Le passage d'une technologie câblée à une technologie sans fil pose un certain nombre de problèmes. La propagation des ondes est influencée par la configuration du terrain (exemple IV.1), les obstructions, les réflexions sur les surfaces et bâtiments et par l'atténuation dans le milieu traversé. Beaucoup d'efforts portent sur le développement de systèmes et de protocoles de transmission basse consommation.

La fiabilité du lien radio est essentielle pour notre application de réseau de capteurs sans fil enfouis dans le béton. Le développement de l'antenne aura aussi un grand impact sur la performance de la communication entre capteurs.

La qualité des communications à travers un canal peut varier de manière importante en fonction du temps, ou bien avec une faible modification environnementale. Il est nécessaire pour comprendre le fonctionnement d'un système de communication radio et améliorer sa consommation, de s'intéresser aux techniques de traitement du signal associées à la mise en œuvre de la couche

physique [18]. Ces techniques doivent notamment permettre d'adapter le signal radio au milieu de propagation.

IV. Quelques exemples de projets utilisant des capteurs sans fil pour la surveillance des structures de génie civil:

Dans cette partie, nous présenterons l'état de l'art des capteurs sans fil pour la surveillance des structures de génie civil.

IV.1. Déploiement des réseaux de capteurs sans fil sur 3 sites du Royaume-Uni : Royaume-Uni en 2009 [19]

Le but de ce projet de recherche est d'évaluer un système de surveillance continue des infrastructures en utilisant les réseaux de capteurs sans fil qui, par rapport aux systèmes câblés, sont plus faciles et moins coûteux à déployer et offrent également la possibilité d'expansion du nombre des capteurs.

Afin d'évaluer l'efficacité des technologies sans fil pour la surveillance des structures de génie civil, des systèmes de réseaux de capteurs sans fil ont été déployés sur 3 sites du Royaume-Uni.

Le premier site, représenté sur la figure 1.5(b) se trouve dans la chambre d'ancrage du nord du pont suspendu Humber. Chacune des quatre chambres d'ancrages souterraines dispose de 5 unités de déshumidification afin d'empêcher les brins d'acier des principaux câbles du pont qui sont en contact avec l'air de se corroder. 12 capteurs sans fil ont été installés dans les chambres pour vérifier que les unités de déshumidification fonctionnaient correctement.

Certains nœuds du RCSF n'étaient pas positionnés dans la même pièce que leur puits, mais se trouvaient dans une chambre adjacente, reliée à la première chambre par un couloir en béton armé de 1 m de largeur, 2 m de hauteur et 15 m de longueur. Ainsi, la distance entre le puits et le nœud le plus éloigné est d'environ 60 m. Cette installation a conduit à des problèmes de propagation radio.



(a) Pont Humber



(b) chambre d'ancrage

Figure 1.5: Le premier site de déploiement (Royaume-Uni).

Le deuxième site, illustré sur la figure 1.6, est un pont en béton armé, connu sous le nom de « Ferriby Road Bridge », situé à plusieurs centaines de mètres au nord du pont de Humber. Dans ce cas, un RCSF a été utilisé pour mesurer la détérioration du pont.

Un RCSF composé de 7 capteurs a été installé, avec trois nœuds dédiés aux mesures des changements dans la largeur des fissures, trois nœuds pour mesurer les déplacements et un nœud final pour des mesures de température.

Bien que la distance maximale entre chaque nœud et le puits ne fût que d'environ 35 m, la disposition des nœuds dans un seul plan a suscité aussi des difficultés de propagation d'ondes radio. Le déploiement du réseau sur la surface du béton a rendu ce dernier facilement accessible au public d'où un problème de sécurité sur ce site.



Figure 1.6: Pont du FerribyRoad [19].

Le troisième site, indiqué sur la figure 1.7, est un tunnel du métro de Londres sur la ligne Jubilee. Un réseau de 26 nœuds a été installé pour mesurer les changements des déplacements, d'inclinaison des appuis, de température et d'humidité relative le long de 180 m du tunnel.

Le déploiement du métro de Londres s'est avéré être le plus favorable en termes de propagation des ondes radio: chaque nœud a réussi à réaliser une connexion immédiatement quand le réseau a été commandé.



Figure 1.7 : Tunnel ligne Jubilee [19].

A partir des différents déploiements des réseaux de capteurs sans fil sur les 3 sites du Royaume-Uni, on peut déduire que l'efficacité de la connectivité radio n'est pas automatiquement garantie ainsi que la sécurité de l'installation qui en résulte.

IV.2. Techniques de surveillance sans fil des structures en béton : USA en 2006 [20].

Dans ce travail, les principes de base d'un système de surveillance sans fil équipé de capteurs sont présentés avec un premier prototype.

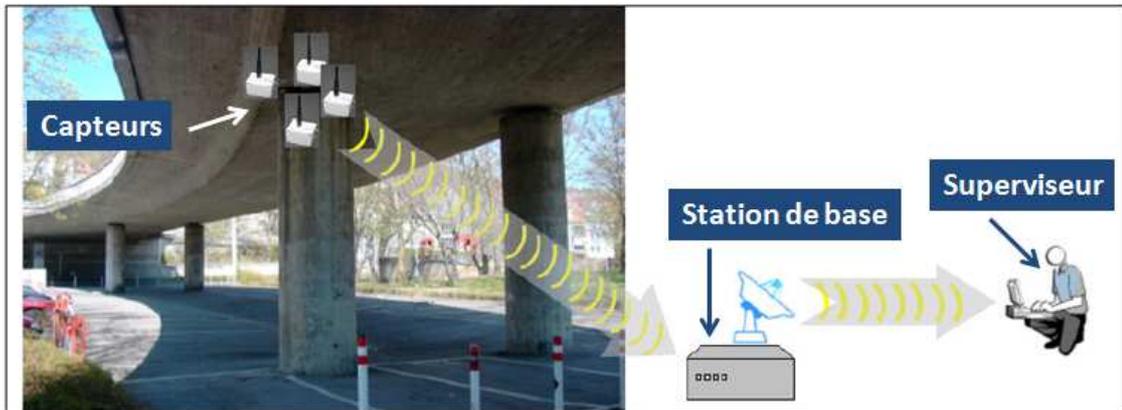


Figure 1.8: Schéma d'un système de surveillance sans fil d'un ouvrage à l'aide des techniques de transmission radio [20].

Les données sont envoyées de la station de base vers le superviseur en utilisant Internet ou des protocoles SMS. Chaque capteur est lui-même un système de mesure et de communication complet. En utilisant des techniques multi-sauts (Cf. chap.3), les données du réseau de capteurs peuvent être transmises sur des courtes distances de l'ordre de 10 m à chaque saut jusqu'à une station de base. Les données recueillies au niveau de la station de base sont stockées dans une base de données pour une analyse ultérieure.

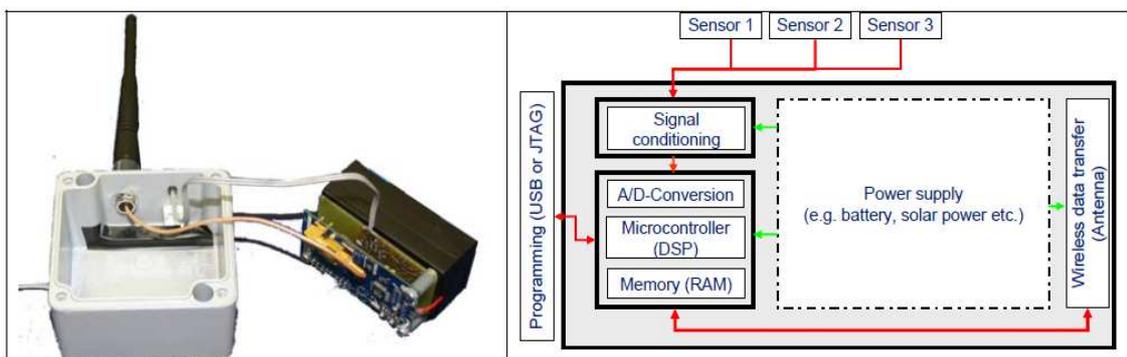


Figure 1.9 : Architecture du capteur (Smartmote) employé dans le test [20].

Chaque nœud est constitué d'un ou plusieurs capteurs (température, humidité, déformation,...), d'une unité d'acquisition et de traitement des données, d'un émetteur-récepteur sans fil et d'une batterie (voir figure 1.9). L'unité d'acquisition et de traitement est équipée d'un microcontrôleur de faible puissance offrant un convertisseur analogique/numérique intégré (CAN) et une mémoire de données suffisante (RAM) pour stocker les mesures.

Un système de surveillance de santé structurale est censé fonctionner pendant de longues périodes de temps, plusieurs mois jusqu'à des années. En raison des contraintes de puissance, la communication sans fil devrait être aussi restreinte que possible. Par conséquent, les nœuds de capteurs doivent prétraiter localement les données de mesure et extraire les paramètres pertinents. Afin que seuls quelques bytes décrivant les caractéristiques des signaux soient envoyés à la station de base.

L'ensemble du système de surveillance, qui doit être installé sur le site, doit résister à des conditions climatiques sévères. Ainsi, les capteurs doivent être robustes, étanches et durables afin que leurs données mesurées soient reproductibles et fiables pendant toute la durée de surveillance. En outre, la stabilité du système, qui inclut le transfert sans fil des données de et vers les nœuds de capteurs, doit être élevée.

IV.3. Suivi d'un pont à l'aide de capteurs intelligents sans fil : Corée du sud [21]

Les chercheurs de l'Illinois ont développé, un système sans fil et peu coûteux pour une surveillance de santé structurale continue et fiable sur le nouveau pont Jindo en Corée du Sud. Les longues portées et les câbles minces du Pont Jindo sont dotés de capteurs sans fil et de microprocesseurs qui contrôlent l'état du pont. Le réseau analyse des facteurs comme les vibrations, le vent et l'humidité, et signale rapidement les anomalies à la station de base.



Figure 1.10 : Pont Jindo [21].

Le réseau du pont Jindo est composé de 663 capteurs sans fil positionnés sur la surface du pont. Ce démonstrateur possède une durée de vie de 3 ans qui correspond à la durée de vie des batteries dans ce type de configuration.

Chaque nœud de capteur est composé d'une plateforme de nœud de capteur sans fil (Imote2) et de plusieurs capteurs : Des capteurs pour mesurer d'un côté l'accélération, la température, l'humidité et la lumière et d'autres capteurs pour mesurer la vitesse et la direction du vent avec un anémomètre ultrasonore 3D.

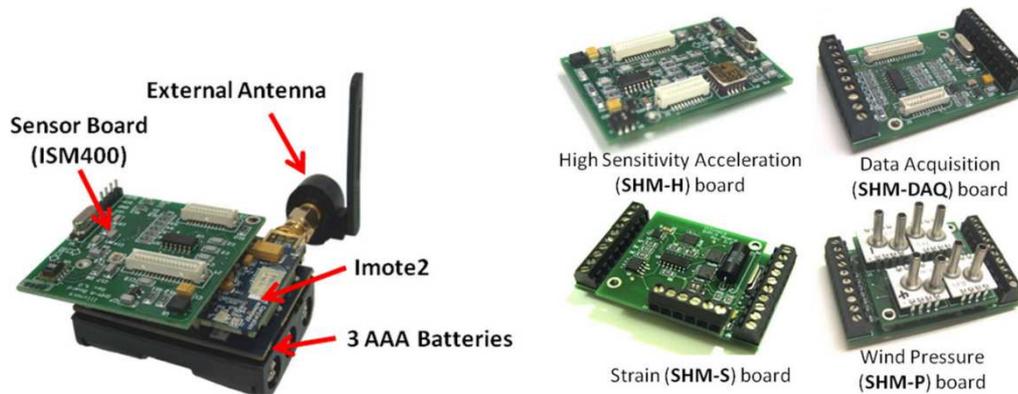


Figure 1.11 : Nœud capteur sans fil assemblé à l'aide d'Imote2 (à gauche) et de différents capteurs de surveillance de santé structurale (SHM). DAQ: dispositif d'acquisition de données.

Chaque nœud de capteur est intégré dans une boîte. Comme la distance de transmission est limitée, les capteurs sont divisés en deux groupes individuels (côté Haenam et côté Jindo comme le montre la figure) et chacun des deux groupes est contrôlé par des stations de base installées sur la tour-piliers du 1er pont Jindo.

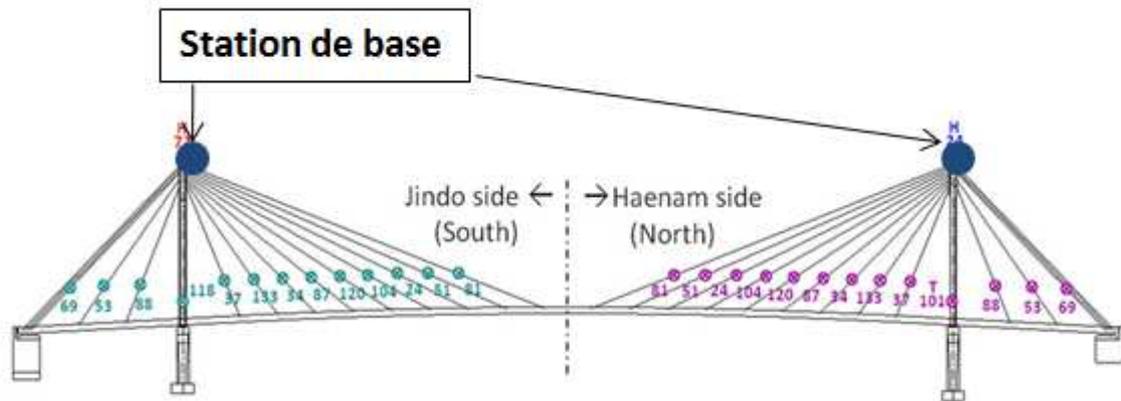


Figure 1.12: Présentation des Capteurs dans le deuxième pont Jindo avec un total de 661 canaux de données.

On peut vérifier la performance du système installé et évaluer les modifications structurales d'un pont existant au cours du temps, à partir des données d'accélération mesurées sur le pont, les câbles et des analyses modales réalisées sous l'excitation de forces ambiantes ou d'opération (le vent, les surcharges sur les ponts,...) en utilisant un modèle numérique de référence (Figure 1.13).

Pour l'étude des structures de génie civil, le paramètre principal à définir pour le choix des capteurs de vibration est la gamme des fréquences mesurables qui est déterminée par l'enregistrement des vibrations ambiantes de la structure. Pour des ponts, la gamme de fréquence des accéléromètres est de 0.1 Hz à 50Hz. Les modes structuraux principaux sont souvent les premiers cinq à huit modes pour une meilleure précision.

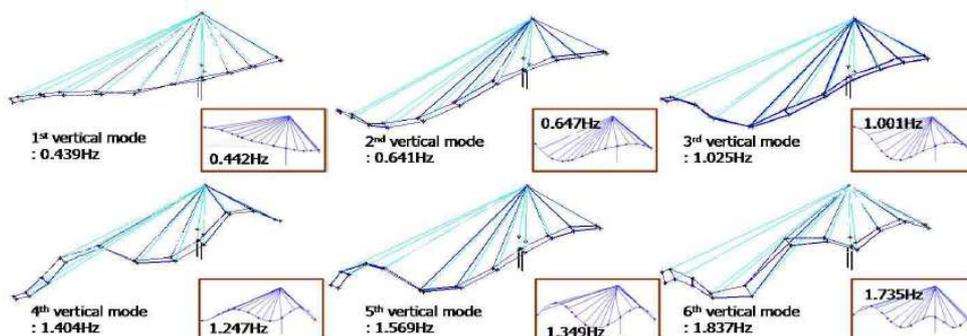


Figure 1.13: Propriétés modales extraites [21].

La figure 1.13 illustre les trois premiers paramètres modaux verticaux analysés à partir des données mesurées par le réseau du côté Jindo et de ceux d'un modèle numérique du Pont. On peut remarquer que les paramètres modaux à partir des données mesurées montrent un excellent accord avec celles du modèle numérique (0.442 Hz, 0.647 Hz, 1.001 Hz).

Une fois l'analyse numérique réalisée, les résultats obtenus peuvent être traités par des méthodes d'évaluation de l'endommagement pour évaluer et localiser les modifications.

L'idée générale est que les caractéristiques dynamiques de la structure obtenues à partir des paramètres modaux de la structure sont fonction des propriétés physiques de la structure (rigidité, masse, amortissement) et que leur modification correspond à un changement des caractéristiques physiques de la structure (une augmentation de la fissuration du béton, une perte de rigidité...).

IV.4. Système de détection de déformation basé sur des capteurs passifs RFID : Japon 2007-2008 [22] :

Ce système mesure les changements et les déformations provoquées par différents types de dégradation avec une durée de vie qui n'est pas limitée par la batterie en utilisant des capteurs RFID passifs.

La RFID 'identification par radio fréquence' permet d'identifier un objet à distance et d'en suivre le cheminement grâce à une étiquette électronique.

Il existe deux grandes familles d'étiquettes RFID :

- Les étiquettes actives, dotées d'une batterie. Elles possèdent une meilleure portée mais une durée de vie restreinte,
- Les étiquettes passives, sont télé-alimentées par un lecteur, en utilisant une des deux approches suivantes : Le couplage magnétique (champ proche) ou électromagnétique (champ lointain).

Ces étiquettes dites passives possèdent une durée de vie illimitée. En contrepartie, elles nécessitent une quantité d'énergie non négligeable de la part du lecteur pour pouvoir fonctionner.

Ce projet explore l'utilisation des capteurs RFID comme des capteurs de déformation interne du béton, Un système de RFID passif en champ proche a été utilisé, opérant à la fréquence de 13,56 MHz.



Figure 1.14: Capteur de déformation (en bleu) [22]

Le tag RFID a été protégé par de la résine et fixé sur les armatures dans le moule (fig.1.14). La portée du système RFID a été mesurée avant et après le placement du béton.

I V.4.1. Influence des armatures :

3 types de treillis (à intervalles de 100mm) ont été testés dans l'air.

L'effet des armatures sur la distance de communication est illustré sur la figure 1.15.

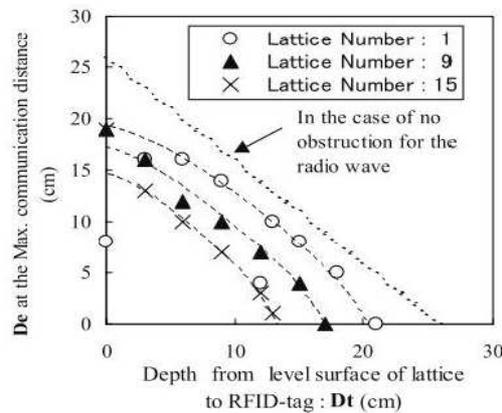


Figure 1.15: influence des armatures sur la distance de communication [22]

D'après la figure 1.15, nous pouvons constater que :

- Plus le treillis est dense et plus la distance de communications est faible
- Le treillis le plus dense a diminué la distance de communication à 11 cm, correspondant à une baisse d'environ 42% puisque la distance de communication sans treillis est de 26 cm.

IV.4.2. Influence du béton :

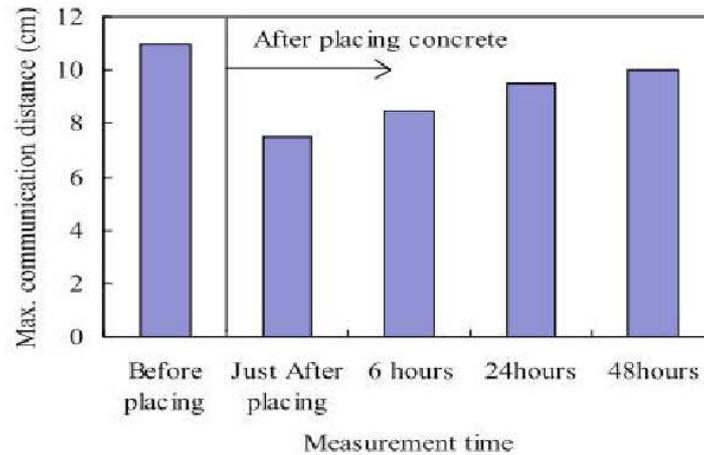


Figure 1.16: Influence du béton sur la distance de communication [22]

Juste après l'écoulement du béton, la distance de communication maximale a été raccourcie à 7 cm de communication (fig.1.16). Après 48H, la distance maximale est égale à 10 cm. Ces résultats confirment que les propriétés du béton évoluent fortement entre le moment où le béton est coulé et le moment où il est durci est que cela impacte la distance de la communication radio.

IV.5. Capteur multi-sensoriel pour la surveillance de santé structurale (Chine 2010) [23]:

Le capteur de température et d'humidité (Sensirion, SHT 75) avec un circuit radiofréquence intégré (RFIC) pour la communication sans fil a été encapsulé dans une boîte de Poly méthacrylate de méthyle ; PMMA pour protéger le module du béton comme illustré sur la figure 1.17.

Le capteur proposé est noyé dans 30cm³ de béton. Un capteur de température Pt-100 et un appareil d'imagerie thermique (Infrascopie TVS200EX) ont été utilisés pour valider les résultats des mesures obtenus avec le capteur Sensirion.

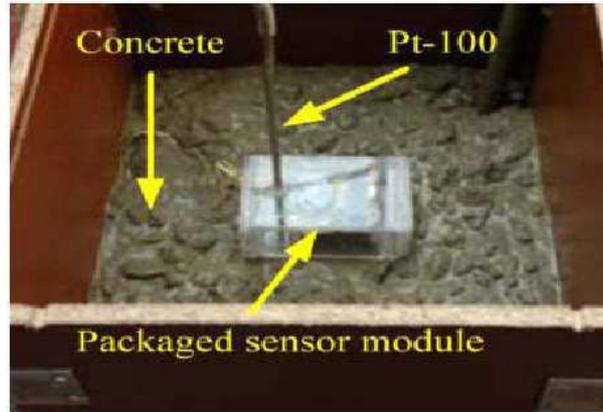


Figure 1.17: Configuration expérimentale du capteur dans le béton [23]

- Mesures de température:

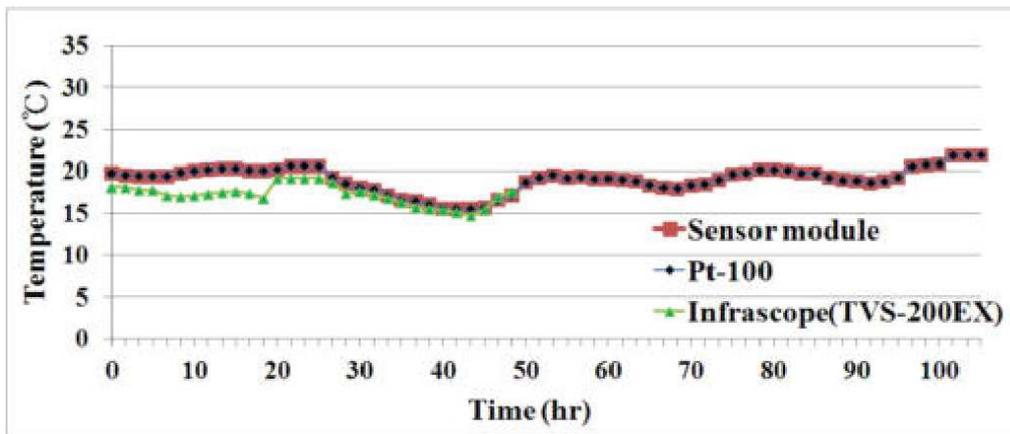


Figure 1.18: Mesures de température avec le capteur sans fil et avec le Pt-100 enfouis dans le béton sur une évolution de 105 heures [23].

La figure 1.18 illustre les mesures de température transmises par la puce RFIC au module de réception externe ainsi que les mesures parallèlement obtenues avec un capteur Pt-100 qui possède aussi la fonction de mesure de l'hydrométrie. Nous pouvons constater un très bon accord entre les différentes mesures puisque la différence de température moyenne est d'environ 0.3°C.

IV.6. Conception et analyse des performances d'un capteur sans fil pour le suivi de durcissement du béton et la santé structurale (Irlande 2011) [24]:

Le système développé a été conçu en utilisant le nœud capteur Tyndall (25x25mm²). Le capteur d'humidité et de température utilisé est le Sensirion SHT11. 2 piles CR2430-3V sont utilisées pour alimenter le prototype.

L'emballage a été fabriqué à partir du plastic Polyoxyméthylène. Les dimensions finales du boîtier sont de 65mm de diamètre et de 45mm de hauteur. Le système opère à la fréquence de 433MHz.

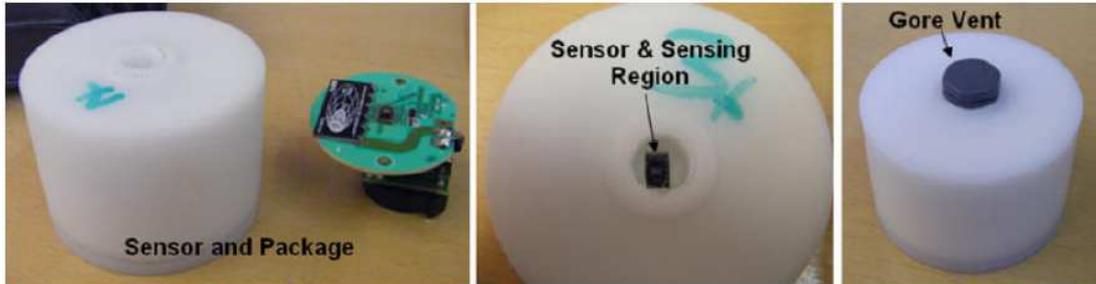


Figure 1.19: Prototype du capteur et du boîtier [24].

Un moule a été conçu en utilisant un coffrage en acier rempli de béton de dimensions 600x600x900 mm³ (LxWxH).

La figure 1.20 montre la construction finale et l'emplacement de chacun des capteurs par rapport au coffrage.

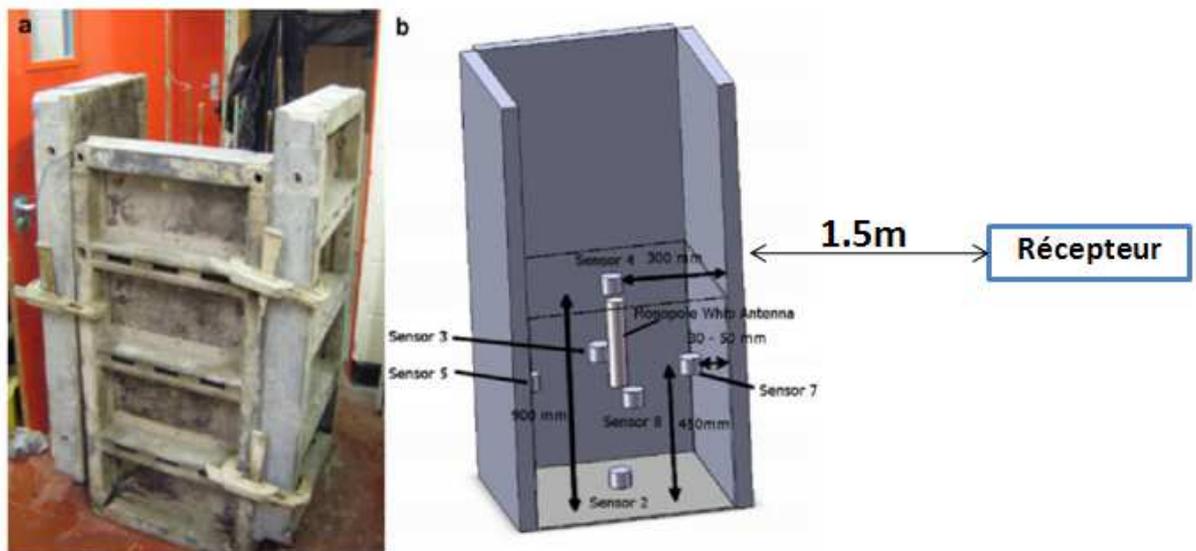


Figure 1.20: Conditions de construction de l'expérience(a)Installation (b) Emplacement de capteurs [24].

Un capteur (n°2) a été placé au fond du moule, 4 capteurs ont été placés au centre des 4 faces de l'éprouvette situé à 40-50mm à partir du bord (n° 5, 3, 7, 8). Enfin, un capteur (n°4) a été placé 40-50mm au-dessous de la surface de la face supérieure du béton. Le récepteur est situé à 1.5m du moule.

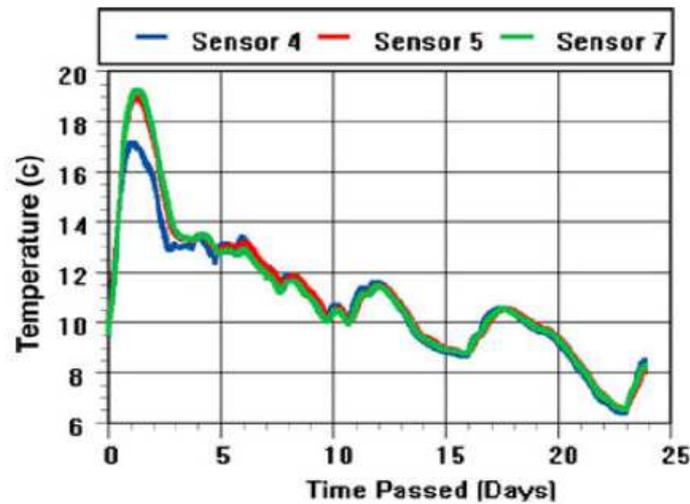


Figure 1.21: Mesures de température en fonction du temps [24].

La température a augmenté au cours des 12 premières heures durant la période où le ciment et l'eau réagissent. La température a atteint un maximum de 18.7°C au bout de 28h, après quoi la température a chuté.

On voit que la température maximale du capteur n°4 est inférieure à celles des autres. Ceci était attendu puisque le capteur n°4 est situé dans la partie supérieure du moule exposé aux conditions ambiantes. La précision du capteur de température a été comparée à un thermocouple placé à côté du capteur, l'erreur entre les 2 mesures est de l'ordre de 1%.

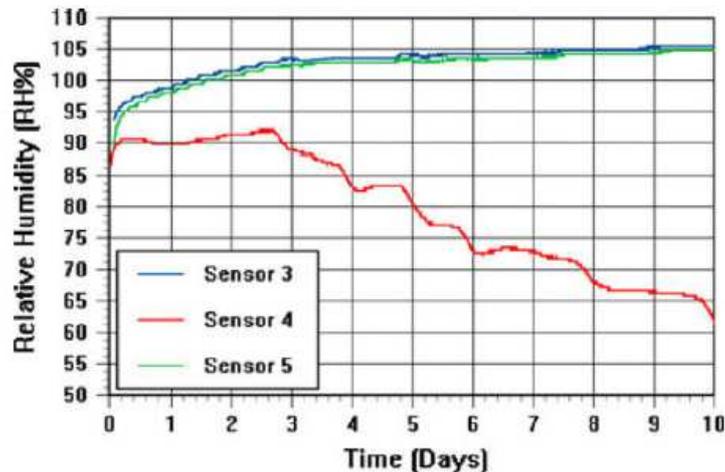


Figure 1.22: Mesures d'humidité relative en fonction du temps [24].

Les lectures d'humidité relative ont montré des résultats intéressants : chaque capteur (1, 2, 3, 5, 7, 8) a atteint un taux d'humidité relative supérieur à 95% au cours des 3 premières heures (fig. 1.22). Nous ne présenterons que les évolutions

de la mesure d'humidité relative pour les capteurs (n°3, 4, 5) pour des raisons de clarté de lecture. On peut constater que pour les capteurs n°3 et 5 le taux d'humidité relative a continué d'augmenter au-delà de 105% au 10^{ème} jour. On peut expliquer ce résultat par la présence d'une condensation au sein de la zone de détection. Par contre, pour le capteur n°4 le taux d'humidité a commencé de diminué au bout du 3^{ème} jour. Le capteur 4 étant près de la surface de l'air ambiant, il n'y a pas eu de phénomène de condensation.

IV.7. Récapitulatif des difficultés rencontrées et les solutions proposées dans les différents projets présentés :

D'après les différents exemples de projets utilisant des capteurs sans fil pour la surveillance des structures de génie civil, on peut énumérer les difficultés rencontrées par ces systèmes et les solutions proposées (Tableau 1.1).

Exemples	Difficultés	Pourquoi	Solutions proposées
IV.1 (-Pont Humber - Pont Ferriby Road -Tunnel ligne Jubilee)	<ul style="list-style-type: none"> - Propagation radio. - Accessibilité facile des capteurs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Atténuation du mur en béton armé. - Capteurs déployés sur la surface des structures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation du réseau. - Sécurité du système.
IV.2 (Pont en USA)	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation d'énergie. - Durée de vie du RCSF limitée. - Robustesse des capteurs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation des batteries. - Communication multi-saut. - Environnement sévère. 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement local des données (réalisé). - Topologie RCSF adéquate. - Conception du Boitier de capteur.
IV.3 (Pont Jindo)	<ul style="list-style-type: none"> - Portée de transmission - Environnement sévère 	<ul style="list-style-type: none"> - Atténuation du béton. - Capteurs déployés sur la surface des 	<ul style="list-style-type: none"> - Topologie de RCSF. -Conception du Boitier de

	- Durée de vie du RCSF limitée (3 ans)	structures - Envoie continue de mesures	capteur. -Récupération d'énergie.
IV.4 (RFID passif)	- Intégration dans le béton armé. - Distance de communication. - Humidité du béton.	- Atténuation du béton armé. - Faible portée des étiquettes passives (26 cm sans armatures).	- Conception du Boitier de capteur. - Fréquence 13.56 MHz.
IV.5 (Caisse de béton)	- Robustesse du capteur. - Mesures Humidité.	- Capteur noyé dans le béton.	- Conception du Boitier de capteur.
IV.6 (Moule de béton)	- Robustesse du capteur. - Mesures Humidité. - Phénomène de condensation.	- Capteur noyé dans le béton. - Position des capteurs.	- Conception du Boitier de capteur.

Tableau 1.1: Difficultés rencontrées et les solutions proposées dans les différents projets.

V. Conclusion :

Les réseaux de capteurs sans fil présentent une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant pour l'application de surveillance de santé de structures.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication et leurs applications dans le domaine du génie civil. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux.

En effet, les réseaux de capteurs sont constitués de dispositifs de faibles dimensions, communiquant entre eux ou diffusant des informations vers des récepteurs. Chaque dispositif élémentaire doit généralement être simple et peu coûteux. Lorsque les capteurs sont déployés de manière dense dans l'environnement, le réseau peut s'auto-organiser pour diffuser les informations recueillies par chaque capteur vers différents récepteurs.

Les réseaux de capteurs sans fil sont conditionnés par des contraintes qui varient entre conception de logiciels et développement de matériel. Pour lever ces différents verrous technologiques qui représentent des paramètres importants pour un système de communication, mon étude va se concentrer sur la durée de vie et la fiabilité du lien radio. Plus précisément, étudier l'architecture du réseau de capteurs sans fil, les canaux de propagation et l'optimisation de la consommation énergétique pour une durée de vie supérieur à 100 ans. Cette étude implique que la connaissance de l'atténuation des ondes électromagnétiques dans le béton et de ces propriétés électromagnétiques sont des données importantes pour établir la portée de communication possible entre deux nœuds de capteurs et pour concevoir l'antenne de communication du nœud de capteur.

Le chapitre 2 de ce mémoire présente les paramètres influençant les propriétés diélectriques du béton qui ont mené au choix de la fréquence et de l'antenne noyée dans le béton pour le banc de mesure. La réalisation d'une communication entre deux antennes patch noyées dans une caisse de béton avec ou sans la présence des armatures a permis de confirmer l'effet de l'humidité du béton et des dimensions des armatures sur l'atténuation des ondes radio dans le béton.

Le chapitre 3 présente l'état de l'art des capteurs de déformation pour la surveillance de santé structurale ainsi que des mesures de température et d'humidité internes du béton réalisés dans une caisse de béton standard pendant 10 jours. Enfin, un calcul des portées de différents capteurs noyés dans le béton permettra de déterminer le choix de la topologie du réseau de capteurs sans fil approprié pour être noyé dans le béton et d'optimiser la consommation énergétique des nœuds.

Chapitre 2

Paramètres électromagnétiques du béton

Sommaire :

I. Introduction	39
II. Propriétés Électromagnétiques d'un matériau	39
II.1. Définitions	39
II.1.1. Définitions de la permittivité complexe.....	39
II.1.2. Définitions de la perméabilité	40
II.1.3. Conductivité électrique	40
II.2. Propriétés Électromagnétiques du béton	40
II.2.1. Atténuation de la propagation de l'onde électromagnétique en fonction de la fréquence	41
II.2.2. Humidité au sein du béton	42
II.2.3. Armature métallique dans le béton	43
II.2.4. Hétérogénéité du béton	44
III. Techniques de caractérisation de la constante de permittivité relative du béton	45
III.1. Méthode basée sur la mesure de la capacité à plan parallèle	46

III.2. Méthode en cavité résonnante	47
III.3. Mesure en propagation guidée	48
III.4. Mesure par sonde coaxiale	49
III.5. Méthode de mesure en espace libre.....	50
III.6. Récapitulatif des différentes techniques.....	51
IV. Choix de la fréquence d'émission des capteurs noyés dans le béton	53
V. Caractérisation du béton à partir de l'étude d'une transmission entre deux antennes noyées dans le béton	53
V.1. Choix de l'antenne pour le banc de caractérisation des propriétés électromagnétiques du béton	54
V.1.1. Définition d'une antenne.....	54
V.1.2. Caractéristiques d'une antenne	54
V.1.2.1. Diagramme de rayonnement en champ lointain	55
V.1.2.2. Directivité	56
V.1.2.3. Rendement	56
V.1.2.4. Gain.....	56
V.1.2.5. Polarisation	57
V.1.2.6. Régions du champ d'une antenne	57
V.1.3. Choix de l'antenne Planaire	58
V.1.4. Antenne Patch	61
V.1.4.1. Structure	61
V.1.4.2. Alimentation d'antenne	62
V.1.4.3. Conception de l'antenne patch	63
V.2. Banc de mesure des caractéristiques électriques du béton	65
V.2.1. Etude de l'influence du Boitier d'air	66
V.2.2. Etude l'influence du type de béton	67
V.2.3. Conception d'une antenne patch noyée dans du béton	70
V.2.4. Réalisation des antennes patch.....	72
V.3. Caractérisation électrique du béton	75
VI. Influence des armatures	77

VI.1. Positionnement des armatures.....	77
VI.2. Dimension des grilles métalliques	79
VI.3. Diamètre des fer-rond	80
VII. Conclusions	81

I. Introduction:

Les réseaux de capteurs sans fil, offrent une amélioration significative des applications existantes de la surveillance de santé structurale. Dans notre étude, les nœuds de capteur seront noyés dans du béton. Etant donné que connaître les constantes diélectriques du milieu de propagation est indispensable pour concevoir l'antenne de communication du nœud de capteur, nous procédons à une revue de la littérature des propriétés diélectriques du béton.

Nous présentons aussi les paramètres influençant ces propriétés diélectriques et les différentes techniques de caractérisation du béton. Cet état de l'art nous mènera ensuite au choix de la fréquence et de l'antenne noyée dans le béton pour concevoir une méthode de mesure basée sur une communication entre deux antennes patch noyées dans une « caisse » de béton et déterminer les propriétés diélectriques du béton ϵ_r et $\tan\delta$ par rétro-simulation.

Enfin, nous présentons l'influence de l'humidité du béton et l'influence des dimensions des armatures sur les coefficients de réflexion et de transmission qui nous aideront à déterminer la position de l'antenne vis-à-vis des armatures dans une structure en béton armé.

II. Propriétés Électromagnétiques d'un matériau :

Chaque matériau possède un ensemble unique de propriétés électromagnétiques qui affectent la façon dont le matériau interagit avec les champs électriques et magnétiques des ondes électromagnétiques.

II.1. Définitions :

II.1.1. Définition de la permittivité complexe:

La permittivité d'un milieu décrit sa réponse à un champ électrique appliqué. La permittivité est généralement une grandeur complexe définie comme suit [25] :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad \text{Eq. 2.1}$$

Où ϵ' est la partie réelle de la permittivité complexe, ϵ'' est la partie imaginaire de la permittivité complexe. En divisant Eq.2.1 par la permittivité de l'espace libre ϵ_0 , la propriété devient sans dimension et relative à la permittivité de l'espace libre :

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) \quad \text{Eq. 2.2}$$

Où ε_r^* est la permittivité relative complexe, ε_r' est la partie réelle de la permittivité relative complexe ou constante diélectrique, ε_r'' est la partie imaginaire de la permittivité complexe ou le facteur de perte, et $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Farad/m.

On définit en général, le rapport de l'énergie perdue à l'énergie stockée dans un matériau par la tangente de pertes ($\tan \delta$):

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad \text{Eq. 2.3}$$

II.1.2. Définition de la perméabilité :

La perméabilité magnétique caractérise la faculté d'un matériau à modifier un champ magnétique. Cette valeur dépend du milieu dans lequel il est produit.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{Eq. 2.4}$$

Où μ_0 est la perméabilité du vide et μ_r est la perméabilité relative qui dépend du matériau.

II.1.3. Conductivité électrique:

La conductivité électrique σ est la grandeur caractérisant l'aptitude d'un matériau à permettre aux charges électriques de se déplacer dans un sens donné au sein de ce dernier lors de l'application d'un champ électrique. Elle est exprimée en siemens par m (S/m).

Tous ces paramètres électromagnétiques peuvent évoluer en fonction de la fréquence, de la température, de l'humidité, et de l'hétérogénéité du matériau.

II.2. Propriétés Électromagnétiques du béton:

Le béton est un matériau non magnétique et non conducteur. De ce fait ses propriétés électromagnétiques sont essentiellement caractérisées par sa permittivité diélectrique complexe avec une perméabilité complexe très proche de la perméabilité de l'espace libre ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry/mètre).

Dans notre étude, les nœuds de capteur seront noyés dans du béton. Le béton constitue donc le milieu dans lequel l'onde radio se propagera. La connaissance de l'atténuation de l'onde électromagnétique est une donnée importante pour établir la portée de communication possible entre deux nœuds et la connaissance de permittivité diélectrique relative du béton $\epsilon'_r(\omega)$ est importante pour concevoir l'antenne de communication du nœud de capteur.

Dans la suite de cette partie, nous présentons différentes données bibliographiques caractérisant l'atténuation de la propagation de l'onde électromagnétique au sein du béton (non armé), l'influence de l'humidité et des armatures métalliques sur la constante de permittivité diélectrique relative du béton

II.2.1. Atténuation de la propagation de l'onde électromagnétique en fonction de la fréquence :

La figure 2.1 illustre l'atténuation de l'onde électromagnétique pour une distance de propagation d'un mètre pour la gamme de 10MHz à 100 GHz, en se basant sur des références sélectionnées [26]. On peut constater que l'atténuation est différente en fonction des publications ce qui peut s'expliquer par le fait que le béton n'est pas totalement identique, mais que l'on peut considérer que l'atténuation augmente en fonction de la fréquence d'environ 13 dB par décade. D'après cette courbe pour une distance de propagation d'un mètre dans du béton l'onde sera atténuée de 92 dB pour une fréquence de travail aux alentours du gigahertz, ce qui est une atténuation très importante. Et plus la fréquence augmentera, plus l'atténuation sera importante.

Au vu de ces valeurs, et si on considère qu'un système de réception est performant avec une sensibilité d'environ -100 dBm, nous focaliserons notre choix de fréquence de communications aux fréquences inférieures au GHz (cf. 2.1).

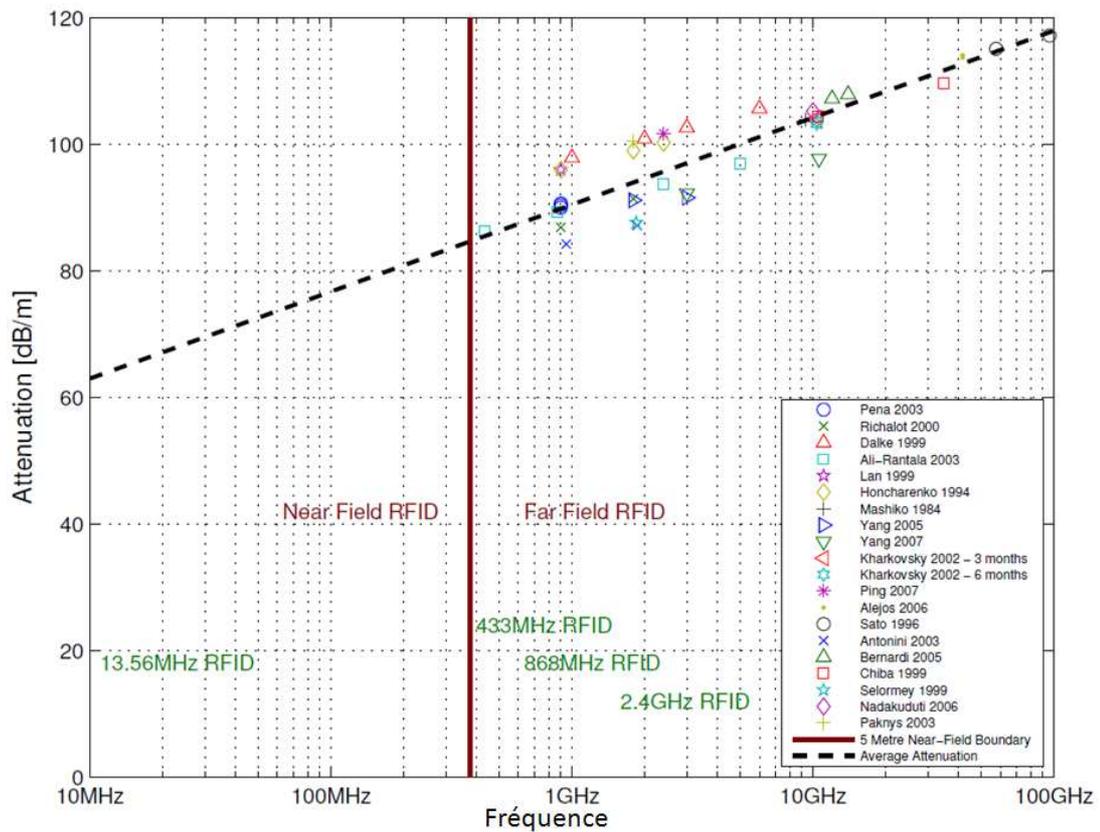


Figure 2.1: Atténuation par mètre en fonction de la fréquence pour une gamme d'échantillons de béton [26].

II.2.2. Humidité au sein du béton:

L'humidité est un constituant important affectant les propriétés diélectriques du béton. La source initiale de l'humidité dans le béton est le mélange de l'eau et du ciment qui est utilisé au moment de la fabrication. Une fois que le béton est placé, il existe de nombreuses autres sources d'humidité. Il s'agit notamment de durcissement humide, d'exposition aux intempéries, de sols supports humides (dans la dalle sur terre-plein de la construction) et de condensation (soit dans le béton ou sur la surface).

En 2001, Soustos [27] a étudié l'influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons et notamment la constante de permittivité relative, pour un ensemble d'échantillons (figure 2.2). On peut constater sur la figure que la constante de permittivité relative augmente avec la teneur en eau. On remarque aussi que la variation des valeurs de la permittivité relative du béton en fonction

de la fréquence est de moins en moins importante jusqu'à devenir constante lorsque la présence d'eau dans le béton est plus faible.

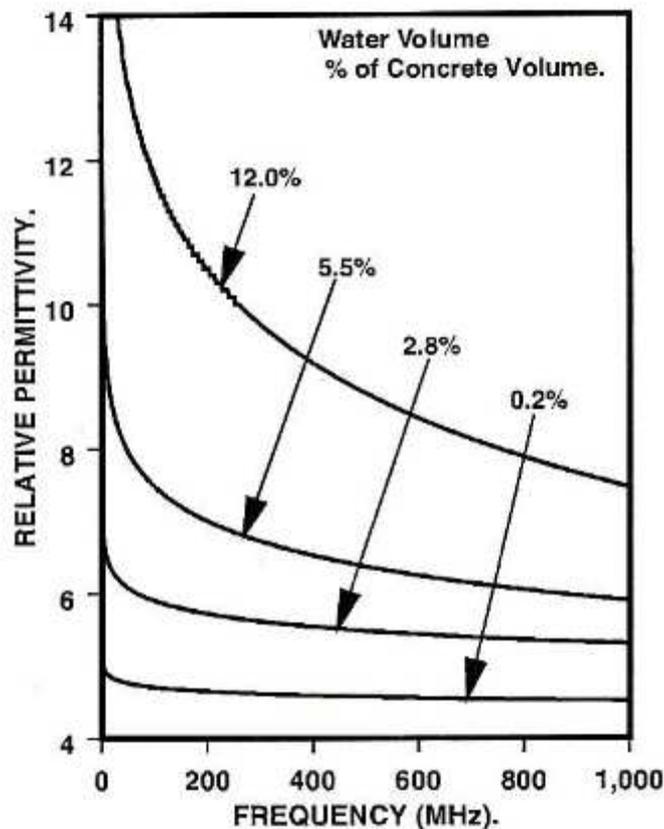


Figure 2.2 : Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons en fonctions de la fréquence [27]

II.2.3. Armature métallique dans le béton : Béton armé

L'atténuation de l'onde radio dans le béton armé peut être affectée par la largeur des armatures en treillis et le diamètre des éléments en acier (cf. illustré fig.2.3).

Dans le cas où les armatures métalliques se situent loin de l'antenne (zone en champs lointain cf. V.1.2.6), les armatures métalliques peuvent être considérées comme un élément du milieu de propagation. Selon la fréquence de travail et les dimensions des armatures par rapport à la longueur d'onde (taille du treillis, dimension des éléments en acier) l'onde émise peut subir une réflexion et/ou peut être diffractée et/ou peut être diffusée [39,40,41].

Dans le cas où les armatures métalliques se situent dans les zones proches de l'antenne, c'est le coefficient de réflexion de l'antenne qui sera perturbé par la présence des armatures métalliques. Les coefficients de réflexion et de

transmission d'une structure en béton armé dépendent des dimensions des armatures et de l'épaisseur de cette structure [28].



Figure 2.3 : Ferrailage d'un poteau

II.2.4. Hétérogénéité du béton :

Le béton est un matériau hétérogène composé de sable, ciment et graviers de tailles variées. Déterminer la permittivité relative du béton n'est pas possible dans ce cas car il faut connaître l'arrangement géométrique exact des constituants du matériau hétérogène. Cependant, un certain nombre d'approches existent qui dépendent du rapport entre la taille des hétérogénéités et la longueur d'onde de l'onde électromagnétique.

L'hypothèse est de considérer que cette taille est beaucoup plus petite que la longueur d'onde. On dit que le milieu est homogénéisable et on le représente par une permittivité effective [25,29]. Cette permittivité effective est la permittivité d'un matériau homogène fictif qui se comporte de façon identique au matériau hétérogène réel. En général, il n'existe pas de solution rigoureuse pour l'évaluation de la permittivité effective des milieux dont la distribution spatiale des inclusions est désordonnée. Le recours, soit à des méthodes numériques pour construire la morphologie interne, soit à des lois de mélange ou à des approches de type milieu effectif (Cf. annexe 1).

Le béton peut être considéré comme un milieu homogénéisable pour les fréquences inférieures au GHz, puisque la taille maximale des granulats utilisés dans notre étude est de l'ordre de 20 mm. Ce qui correspond à une taille

négligeable par rapport à la longueur d'onde pour les fréquences inférieures à 1GHz.

Cependant en haute fréquence, la taille des granulats n'est plus négligeable par rapport à la longueur d'onde. La permittivité des granulats joue aussi un rôle important sur la permittivité du béton. Une variation de 17% de la permittivité des granulats implique une variation de 12% de la permittivité du béton [30].

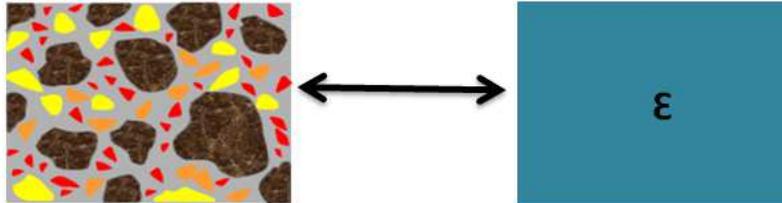


Figure 2.4 : Milieu homogénéisable

III. Techniques de caractérisation de la constante de permittivité relative du béton :

Pour déterminer la permittivité relative du béton, différentes méthodes de mesure peuvent être utilisées. Dans la littérature on distingue trois grands types de techniques de caractérisation :

- La méthode basée sur la mesure de la capacité à plan parallèle
- La méthode à partir de mesure en propagation guidée (ligne ou cavité résonnante)
- La méthode à partir de mesure en espace libre

Etant donné l'hétérogénéité du béton, le volume des échantillons à mesurer doivent satisfaire le critère de VER. Le volume Elémentaire Représentatif (VER) est défini comme la taille minimale requise qui permet de calculer une propriété effective indépendante de la méthode de mesure choisie [30]. En se basant sur les calculs théoriques utilisés dans l'étude des propriétés mécaniques du béton pour dimensionner les échantillons [31]. Le VER est défini par une longueur qui correspond à 3 fois la taille maximale des hétérogénéités.

III.1. Méthode basée sur la mesure de la capacité à plan parallèle :

Le principe de cette méthode est basé sur le déplacement d'un champ électrique uniforme à travers l'échantillon. En utilisant un analyseur de réseau vectoriel et en

calculant l'admittance d'entrée Y_{11} à partir de la mesure du coefficient de réflexion, on peut remonter à la valeur de la capacité et donc à la valeur de la permittivité relative du matériau (voir Figure 2.5).

La valeur d'une capacité à plan parallèle est déterminée par la formule suivante :

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad \text{Eq.2.5}$$

En connaissant la valeur de la capacité, on peut donc remonter à la partie réelle de la permittivité relative du diélectrique qui constitue la capacité à plan parallèle. Cette méthode est utilisable uniquement dans le domaine des basses fréquences. En effet, les hypothèses de cette méthode sont les suivantes [30] :

- Dimensions du motif de test doit être très petit devant la longueur d'onde ($L \ll \lambda/20$).
- Valeur de la capacité indépendante de la fréquence.
- Matériau diélectrique homogène.

L'avantage principal de cette méthode est sa mise en œuvre simple. Par contre les principaux inconvénients de cette méthode sont :

- La nécessité d'un usinage précis de l'échantillon,
- La nécessité de réaliser des très bons contacts entre les électrodes métalliques et les surfaces du matériau diélectrique (élément test).

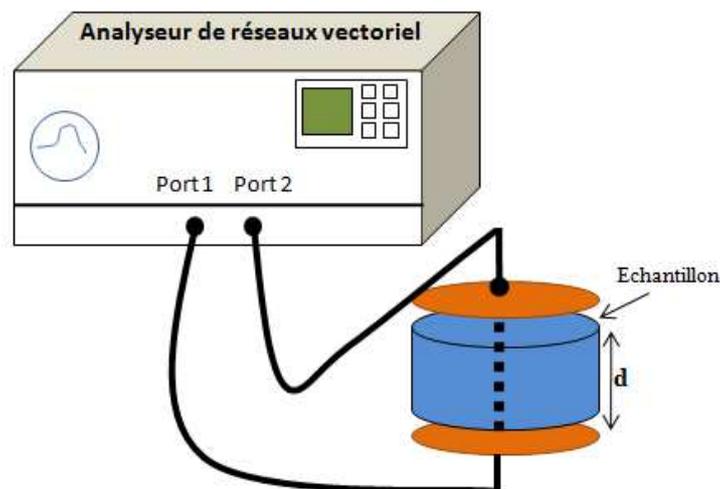


Figure 2.5 : Schéma du dispositif de mesure de la capacité à plan parallèle

Pour la caractérisation de la constante de permittivité du diélectrique du béton, la méthode basée sur la détermination de la capacité à plan parallèle n'est donc pas adaptée puisqu'il est difficile d'obtenir des surfaces planes et parce que l'hétérogénéité du béton nécessite un volume suffisamment grand pour satisfaire le critère de VER.

III.2. Méthode en cavité résonnante :

Le principe de cette méthode repose sur le phénomène de résonance des ondes électromagnétiques. L'échantillon est placé dans une cavité métallique contenant de l'air et relié à un analyseur de réseau. Les formes géométriques de la cavité les plus utilisées sont cylindriques et rectangulaires (voir Figure 2.6). La cavité est portée à la résonance sans et avec l'échantillon par une onde électromagnétique à des fréquences particulières 'fréquences de résonance' [33].

Les différences observées entre les fréquences de résonance et les variations du facteur qualité permettent de déterminer les propriétés diélectriques de l'échantillon. Le domaine de mesure de cette technique est de 500 MHz - 6 GHz [32]. Cette technique permet des mesures ponctuelles donc pour une plage de fréquence large il est nécessaire d'utiliser différentes cavités.



Figure 2.6 : Photo de la cavité résonnante cylindrique [33].

III.3. Mesure en propagation guidée :

Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure des paramètres S d'un guide d'onde. L'échantillon à caractériser est placé à l'intérieur du guide d'onde. Les coefficients de réflexion et de transmission mesurés à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel permettent de déterminer les propriétés diélectriques de l'échantillon [30].

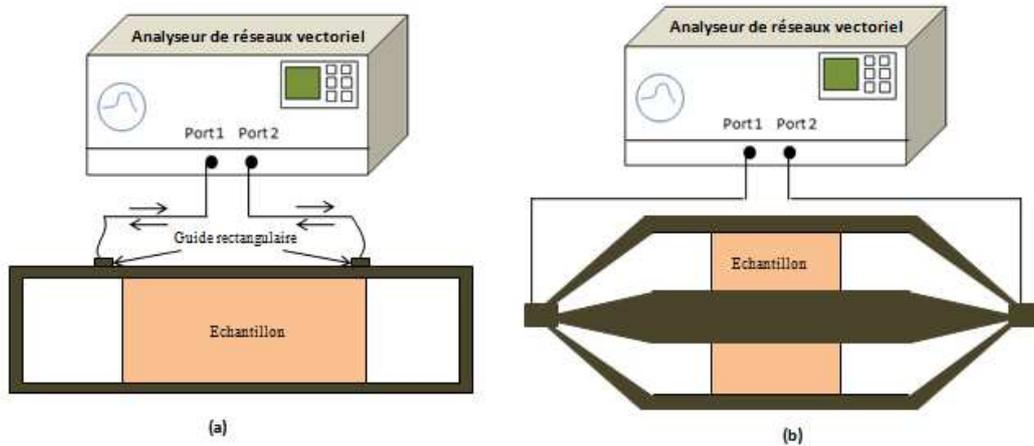


Figure 2.7: (a) Schéma de mesure en guide d'onde rectangulaire (b) Schéma de mesure par ligne de transmission coaxiale.

La méthode en guide d'onde rectangulaire permet des mesures sur la bande de fonctionnement du guide d'onde mais la réalisation de l'échantillon de béton aux dimensions voulues avec des parois lisses n'est pas évidente pour les fréquences inférieures à 1 GHz.

La méthode de ligne de transmission coaxiale est utilisée pour caractériser les matériaux dans une large bande de fréquence. Cependant, elle nécessite des échantillons de forme torique et impose des contraintes sévères sur leur qualité d'usinage.

III.4. Mesure par sonde coaxiale :

La méthode de mesure par sonde coaxiale est basée sur la mesure du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence des ondes électromagnétiques guidées et réfléchies à l'ouverture de la sonde. Une sonde coaxiale est un guide d'onde constitué de deux cylindres coaxiaux et une ouverture qui est mise en contact avec la surface plate de l'échantillon (voir figure 2.8).

L'analyseur de réseau vectoriel génère des ondes électromagnétiques à travers la sonde et permet de détecter la réflexion à l'ouverture de la sonde et par la suite la partie réelle et imaginaire de la permittivité en fonction de la fréquence. La technique de mesure par sonde coaxiale est une technique simple et flexible. Cependant, elle nécessite des surfaces plates et lisses donc un usinage précis en surfaçage [33].

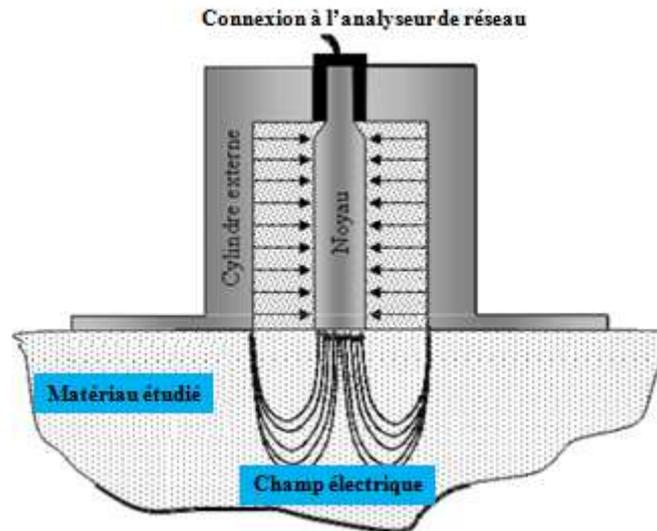


Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'une sonde coaxiale.

III.4. Méthode de mesure en espace libre :

La méthode en espace libre est basée sur la mesure du coefficient de réflexion et ou du coefficient de transmission d'une onde électromagnétique incidente sur l'échantillon à caractériser. Un échantillon sous la forme d'une plaque d'épaisseur donnée est inséré entre deux antennes perpendiculairement à la direction de propagation ce qui permet de mesurer le paramètre S et de déterminer la permittivité complexe à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel (voir figure 2.9) [34].

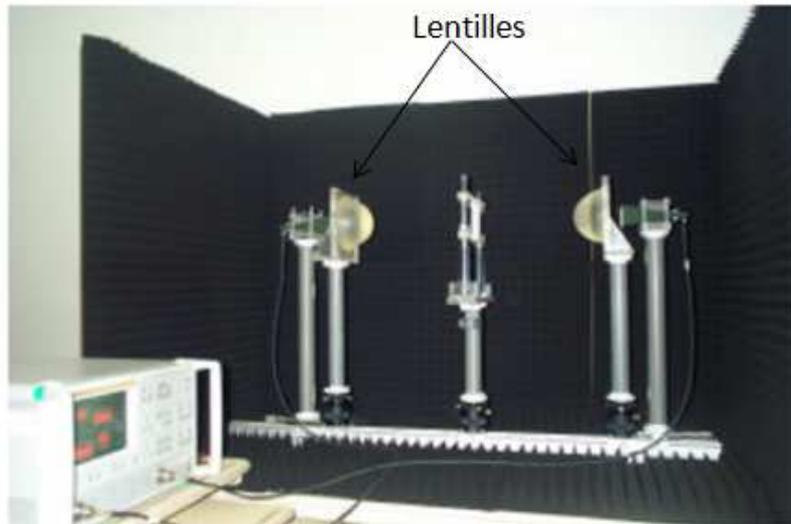


Figure 2.9 : Schéma de mesure en espace libre [34].

Cette méthode est utilisée dans le domaine des ondes millimétriques (bande W et Ka) car elle nécessite à ces fréquences des échantillons de dimensions raisonnables. Selon la taille de l'échantillon, il est nécessaire d'approcher ou d'éloigner les sources d'émission et de réception. Il est évident que la mesure sera plus précise sur de larges plaques que sur des petits éléments [35].

A titre d'exemple des échantillons de dimension de $35 \times 35 \text{ cm}^2$ sont utilisées dans la bande Ka (26,5 GHz – 42 GHz) et des dimensions de l'ordre du mètre pour des fréquences au-dessous de 20 GHz [36] & [30].

III.5. Récapitulatif des différentes techniques de mesure appliquées pour la détermination de la permittivité relative du béton :

Nous présentons dans le tableau suivant (tableau 2.1) les avantages, les inconvénients et les difficultés d'utilisation de la méthode appliquée au béton

Techniques	Avantages	Inconvénients	Difficultés à utiliser la méthode
Méthode « capacité plan »	-Simple et économique	-Basse fréquence	-Mesures basses fréquence <1GHz. -Nécessite que l'échantillon possède des surfaces planes -Taille de

			l'échantillon de béton important pour une représentativité du matériau
Méthode en cavité résonnante	-Grande sensibilité	-Forme de la cavité -Mesure ponctuelle	-Critère de VER non respecté.
Mesure en propagation guidée	-Mesure large bande	-Usinage de l'échantillon aux dimensions de la structure de propagation. -Précision 5%	-Plusieurs guides de dimensions différentes (guide rectangulaire) -Taille de l'échantillon faible donc la composition du matériau n'est pas représentative - Echantillon de forme torique (ligne de transmission)
Sonde coaxiale	-Simple et flexible -Large bande	-Contact avec surface plate. -Mesure de réflexion à la surface et non à travers le matériau	-Besoin de techniques de propagation à travers le matériau pour la comparaison
Méthode de mesure en espace libre	-Aucun contact avec le matériau	-Echantillons plats ayant une surface supérieure à la largeur du rayonnement. -Taille de l'échantillon grand pour des fréquences inférieures 5 GHz	-Réflexions multiples -bande Ka dimension des échantillons est 35x35 cm². -Au-dessous de 20 GHz ; dimension de l'ordre du mètre -Poids de l'échantillon à tester pour des fréquences inférieures à 5 GHz

Tableau 2.1 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de mesure de la permittivité du béton.

D'après les indications du tableau, nous pouvons constater que les techniques décrites ci-dessus présentent des difficultés importantes à les appliquer pour la détermination de la constante diélectrique relative du béton pour des fréquences autour du GHz.

Nous cherchons à déterminer les caractéristiques électromagnétiques du béton afin de concevoir de façon optimum des réseaux de capteurs enfouis dans du béton. Pour cette application, le béton constituera le milieu dans lequel l'onde émise par les nœuds des capteurs se propagera.

De ce fait, nous avons choisi de déterminer la constante diélectrique relative du béton et l'atténuation de l'onde émise en étudiant :

* Les paramètres expérimentaux S_{ij} d'une transmission entre deux antennes noyées dans le béton comme illustré sur la figure 2.10.

* Le coefficient de réflexion et de transmission théorique de cette transmission.

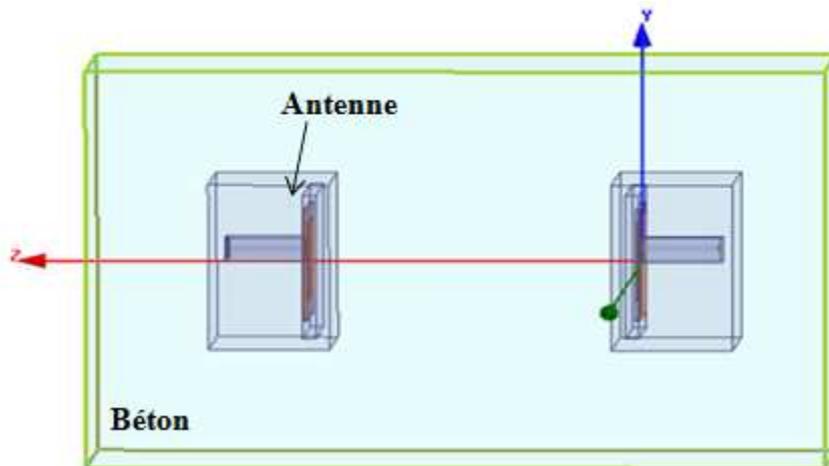


Figure 2.10 : Deux antennes noyées dans le béton.

Pour cette méthode les antennes devront être de faible bande passante, afin de déterminer précisément la valeur de la permittivité relative. En effet pour ce type d'antenne, une fluctuation de la valeur de la permittivité relative du diélectrique possède une influence directe sur le coefficient de réflexion de l'antenne. La précision de la méthode est de 1%. Avant de détailler cette méthode, nous présentons dans le paragraphe suivant le choix de la fréquence d'émission.

IV. Choix de la fréquence d'émission des capteurs noyés dans le béton :

La fréquence d'émission doit être inférieure à 1 GHz (cf. 2.1.1) pour obtenir une atténuation de l'onde émise $< 92\text{dB}$ pour une distance de transmission d'1 m.

Dans cette gamme de fréquences ($< 1\text{GHz}$), il existe en France deux bandes ISM dont les bandes de fréquences peuvent être utilisées librement pour des applications industrielles, scientifiques et médicales. Elles sont réglementées au niveau de la puissance maximum d'émission, de la largeur du canal utilisée par ceux-ci ou même de la durée d'utilisation.

Les deux bandes ISM sont :

- La bande 433 MHz: La largeur de cette bande est égale à 1.74MHz (433.050MHz à 434.790MHz), mais il n'y a pas de canaux imposés. De plus, elle n'est pas harmonisée au niveau européen. Néanmoins, la Puissance Apparente Rayonnée (PAR) est limitée à 10mW maximum.
- La bande 868 MHz: La largeur de cette bande est à 7MHz (863MHz à 870MHz). Elle est harmonisée au niveau européen. La Puissance Apparente Rayonnée (PAR) est limitée à 500 mW. Ce niveau de puissance autorisée permet des communications de moyenne portée [37]

Au vu des spécifications des deux bandes ISM, nous choisissons la bande ISM 868 MHz pour les raisons suivantes :

- * La PAR est plus importante que pour la bande ISM 433 MHz.
- * La taille d'antenne sera plus faible, donc l'encombrement moins important que pour la bande 433 MHz.

V. Caractérisation de la permittivité relative et des pertes de transmission du béton à partir de l'étude d'une transmission entre deux antennes noyées dans le béton :

Le banc de caractérisation que nous avons réalisé est composé de deux antennes noyées dans du béton dans une caisse en plastique de dimension (55 x 36 x 20) cm^3 (L x W x H) et les deux antennes sont reliées à un analyseur de réseau vectoriel comme illustré figure 2.11.



Figure 2.11 : Banc de caractérisation

De ce fait, les dimensions des antennes doivent permettre qu'elles soient noyées complètement dans le béton et comme la détermination des pertes de transmission introduites par le béton s'effectuera à partir de la mesure du coefficient de transmission S_{21} . Nous avons choisi d'utiliser des antennes planaires dont le diagramme de rayonnement est principalement dans un demi-plan car il faut que la puissance recueillie par l'antenne de réception provienne de la puissance rayonnée d'onde émise directement par l'antenne d'émission sans réflexion parasite.

V.1. Choix de l'antenne planaire pour le banc de caractérisation des propriétés électromagnétiques du béton :

V.1.1. Définitions d'une antenne:

Une antenne est un dispositif qui permet de rayonner dans l'espace l'énergie hyperfréquence fourni par un générateur [38].

- A l'émission, son rôle est de convertir un signal électrique localisé dans un circuit en une onde électromagnétique qui sera rayonnée dans l'espace environnant.
- A la réception, une antenne est soumise aux champs électromagnétiques ambiants ; elle peut les détecter en étant le siège de courants induits.

V.1.2. Caractéristiques d'une antenne :

Une antenne peut se définir à partir des critères suivants:

- Diagramme de rayonnement.
- Directivité et gain.
- Polarisation.

- Type d'antenne (dimensions et forme).
- Bande de fréquences d'utilisation, etc.

Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d'une antenne par rapport à l'antenne de référence qu'est l'antenne isotrope.

Une antenne isotrope est une antenne fictive de référence, elle rayonne de façon identique dans l'espace environnant, avec un rendement de 100%.

V.1.2.1. Diagramme de rayonnement en champ lointain:

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est défini comme étant la fonction mathématique ou la représentation graphique des propriétés de rayonnement d'une antenne en fonction du système de coordonnées. Ce type de représentation est illustré sur la figure 2.12. Les paramètres liés au rayonnement sont la densité de puissance rayonnée, l'intensité de radiation, la directivité, et la polarisation.

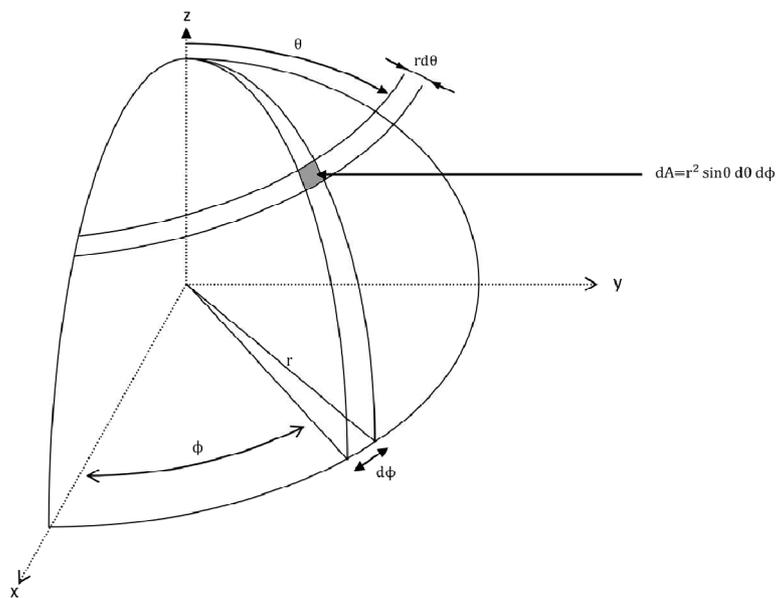


Figure 2.12: Représentation polaire du diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est censé être mesuré pour tous les points de l'espace, à une distance infinie de l'antenne (sphère de rayon infinie). En pratique on mesure généralement la puissance rayonnée dans le plan E et le plan H [42].

Le plan E constitue le plan où le champ électrique est maximal. Le plan H est le plan perpendiculaire où le champ magnétique est maximal.

V.1.2.2. Directivité :

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans une direction donnée $U(\theta, \varphi)$ et la densité de puissance d'une antenne isotrope [43].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} \quad \text{Eq.2.6}$$

V.1.2.3. Rendement :

Le rendement η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée P_A sous forme de puissance rayonnée P_R . On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par l'antenne et la puissance qui lui est fournie.

Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations précédentes, on voit que le rendement relie le gain et la directivité [44].

$$P_R = \eta \cdot P_A \quad \text{Eq.2.7}$$

P_A : Puissance fournie à l'antenne par l'émetteur (en W).

P_R : Puissance émise (rayonnée) par l'antenne (en W).

V.1.2.4. Gain :

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans cette direction $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes [44].

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \quad \text{Eq.2.8}$$

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB. Le gain est généralement exprimé en dB_i car une antenne isotrope est utilisée comme référence.

Selon le standard IEEE, le gain ne prend pas en compte les pertes dues aux désadaptations d'impédance et d'erreur de polarisation. Cependant, ces pertes peuvent être importantes et doivent être prises en compte. On peut relier le gain d'une antenne à sa directivité selon l'équation suivante :

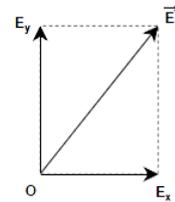
$$\mathbf{G} = \eta \cdot \mathbf{D} \quad \text{Eq.2.9}$$

V.1.2.5. Polarisation :

La polarisation d'une antenne est celle du champ électrique de l'onde qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit de façon privilégiée (son lobe principal) [45]. Dans le cas général, le champ électrique peut être décomposé sur les axes OX et OY, suivant 2 composantes E_x et E_y différentes en amplitude et en phase [44].

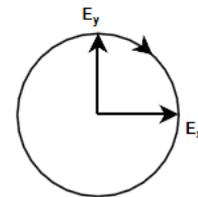
- Onde polarisée linéairement

Si E_x et E_y sont en phase, leur résultante est linéaire, le vecteur reste constamment dans le plan défini par l'axe de propagation et la résultante de E_x et E_y .



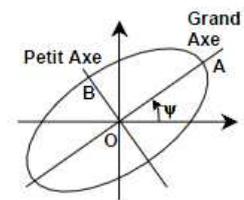
- Onde polarisée circulairement.

Si E_x et E_y sont égaux en amplitude et différent en phase de 90° , l'extrémité du vecteur résultant décrit un cercle, en fonction du temps dans le plan d'onde.



- Onde polarisée elliptiquement.

Dans le cas où il n'y a pas égalité d'amplitude et que le déphasage est quelconque.



V.1.2.6. Régions du champ d'une antenne:

L'espace entourant une antenne est généralement subdivisé en 3 régions: (a) Champ proche réactif, (b) Champ proche rayonnant « Fresnel » et (c) Champ lointain « Fraunhofer » comme indiqué sur la figure 2.13.

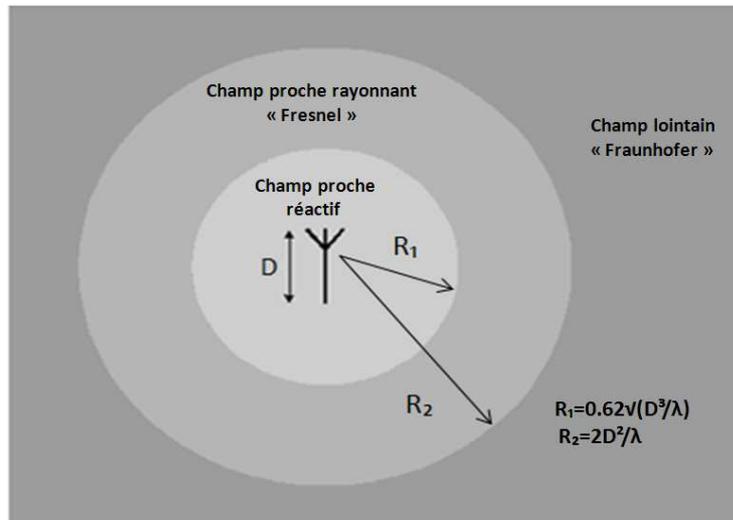


Figure 2.13: Régions du champ d'une antenne

Champ proche réactif : est défini comme 'la partie de la région du champ proche entourant immédiatement l'antenne'. Pour la plupart des antennes, la limite extérieure de cette région existe à une distance $R < 0,62 \sqrt{D^3/\lambda}$ à partir de la surface d'antenne, où λ est la longueur d'onde et D est la plus grande dimension de l'antenne.

Champ proche rayonnant « Fresnel » : est défini comme 'le champ de l'antenne entre le champ proche réactif et le champ lointain. Si l'antenne a une dimension maximale qui n'est pas grande par rapport à la longueur d'onde, cette région peut ne pas exister. Pour une antenne focalisée à l'infini, la région du champ proche rayonnant est parfois désignée comme la région de Fresnel. La limite intérieure est prise à une distance égale à $R \geq 0,62\sqrt{D^3/\lambda}$ et la limite extérieure à une distance $R < 2D^2/\lambda$.

Champ lointain « Fraunhofer » : est défini comme la région de champ de l'antenne lorsque la distribution du champ angulaire est essentiellement indépendante de la distance de l'antenne. Si l'antenne a une dimension maximale D d'ensemble, la région de champ lointain existe généralement à des distances supérieures à $2D^2/\lambda$ de l'antenne [46].

V.1.3. Choix de l'antenne Planaire:

Les antennes plaquées ou antennes imprimées sont des structures planaires à faible encombrement. Les techniques de gravures chimique et mécanique ont permis de réduire leur coût de fabrication et de miniaturisation [47] :

Le Tableau 2.2 présenté ci-dessous, résume les différentes structures d'antennes planaires et leurs caractéristiques en termes de digramme de rayonnement, de directivité, de polarisation et de bande passante [49].

Antenne		Diagramme de rayonnement	Directivité	Polarisation	Bande passante	Commentaire
Patch		Broadside	Moyenne	Linéaire Circulaire	Faible	-Très facile à réaliser -Rayonnement 3D
Fente		Broadside	Faible Moyenne	Linéaire	Moyenne	Bidirectionnelle
Cercle		Broadside	Moyenne	Linéaire Circulaire	Faible	Difficile à alimenter
Spirale		Broadside	Moyenne	Linéaire	Large	-Balun pour l'alimentation
Papillon		Broadside	Moyenne	Linéaire	Large	-Balun pour l'alimentation. -Rayonnement omnidirectionnel
Vivaldi		Endfire	Importante	Linéaire	Large	-Transition (fente/microruban ou coplanaire) pour l'alimentation. -Rayonnement 2D
Yagi fente		Endfire	Moyenne	Linéaire	Moyenne	Deux niveaux de métallisation
Quasi-Yagi		Endfire	Moyenne Importante	Linéaire	Large	Uni planaire et compact
Log-périodiques		Endfire	Moyenne	Linéaire	Large	Deux niveaux de métallisation -Rayonnement Bidirectionnel

Tableau 2.2: Différents types d'antennes planaires

Avec :

- Broadside : diagramme de rayonnement est orthogonal au plan d'antenne
- Endfire : l'antenne rayonne dans le plan de l'antenne

Les antennes à Fente, à cercle, spirale, Papillon et log-périodique présentent un diagramme de rayonnement omnidirectionnel (ou pas dans un seul demi-plan). Elles ne sont donc pas appropriées pour le banc de mesure.

Les antennes Yagi possèdent un diagramme de rayonnement principalement dans la direction de l'antenne, mais les lobes arrière ne sont pas négligeables (voir figure 2.14). De ce fait nous n'avons pas choisi ce type d'antenne pour le banc de mesure.

L'antenne Vivaldi ainsi que l'antenne patch sont des antennes qui possèdent un diagramme de rayonnement principalement dans un demi-plan comme illustré figure 2.14.

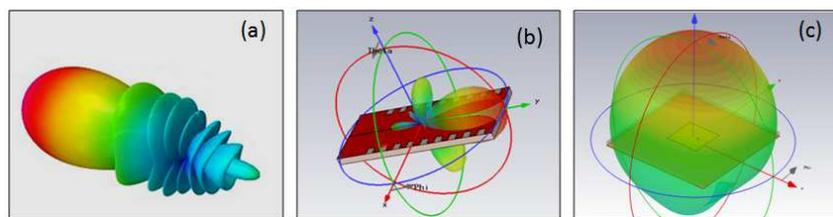


Figure 2.14 : Rayonnement (a) d'une antenne Yagi, (b) d'une antenne Vivaldi et (c) d'une antenne Patch [48].

L'antenne Vivaldi est une antenne large bande ce qui est intéressant pour la caractérisation du béton. Par contre elle possède un diagramme de rayonnement dans le prolongement de l'antenne. Les dimensions de cette antenne dans la bande ISM (868 MHz) ne permettent pas de travailler en champs lointain quand on utilise deux antennes Vivaldi dans la « caisse en plastique » qui constitue notre environnement du banc de mesure. La taille de cette caisse a été choisie pour faciliter son déplacement sur le site.

Nous avons donc choisi de travailler avec des antennes de type patch, puisque son diagramme de rayonnement se situe d'un un demi-plan et orienté perpendiculaire à l'antenne. L'utilisation de deux antennes dans la « caisse » du banc de mesure permet d'effectuer des mesures de type champs lointain. La bande passante est relativement faible.

Pour une caractérisation plus large il faudra réaliser des antennes qui fonctionnent dans des gammes de fréquences différentes. Le banc de mesure peut être utilisé

facilement pour des fréquences élevées. Par contre pour des fréquences plus faibles, il faudra choisir des tailles d'antennes qui permettent de rester dans les conditions de champ lointain. Pour ce faire, il faudra soit utiliser des méthodes pour compacter l'antenne (antenne quart d'onde, PIFA, ...), soit utiliser des matériaux à constante diélectrique très élevée au détriment de la bande passante.

V.1.4. Antenne Patch:

Une antenne patch est constituée d'une plaque métallique appelée élément rayonnant, située sur la face supérieure d'un substrat diélectrique. La face inférieure de la lame diélectrique est métallisée et constitue le plan de masse [50]. Les antennes Patch présentent de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques (dipole, Yagi,...). On peut énumérer les avantages suivants :

- Faible poids, encombrement réduit, conformations possibles
- Faible coût de fabrication, production en masse facile
- Polarisation linéaire et circulaire possibles
- Antennes multi bandes, multi polarisations
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Large domaine de fréquence: 100MHz à 100 GHz.

D'autre part, les antennes patch comportent également quelques inconvénients par rapport aux antennes classiques:

- Bande passante étroite
- Faible efficacité de rayonnement si ϵ_r est élevée
- Faible gain (généralement 6dB)
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces pour des antennes réalisées sur des substrats à permittivité diélectrique élevée.

V.1.4.1. Structure :

Une antenne patch consiste en un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse). Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante, sa structure est détaillée ci-dessous [51].

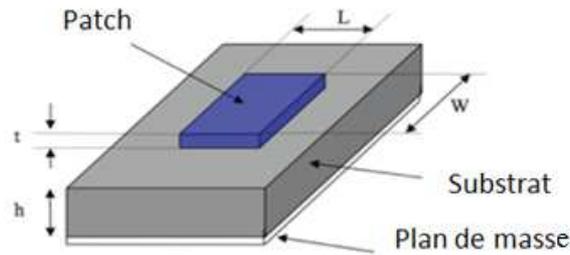


Figure 2.15: Structure d'une antenne patch

Afin de faire des prédictions de performance, l'antenne patch rectangulaire possède les paramètres suivants, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide aussi appelée la longueur d'onde en espace libre.

- Longueur (L): $0.3333\lambda_0 < L < 0.5\lambda_0$ ce paramètre fixe la fréquence de résonance de l'antenne
- Largeur (W) : $0.5L < W < 2L$
- Hauteur (h): $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$
- Épaisseur (t): $t \ll \lambda_0$
- Constante diélectrique (ϵ_r): $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$

V.1.4.2. Alimentation d'antenne:

L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les trois principaux types sont :

- **Alimentation par ligne:** une ligne microstrip est reliée au patch et lui amène l'énergie. Elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite.
- **Alimentation par connecteur:** un connecteur standard (SMA) est soudé au plan de masse qui est perforé pour permettre à l'âme centrale d'être reliée au patch en traversant le diélectrique. L'énergie est amenée par guide coaxial.
- **Alimentation par fente:** une ligne est disposée au dos du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne [52].

Pour minimiser les rayonnements parasites dus à l'alimentation de l'antenne, nous avons choisi une alimentation par connexion coaxiale. Le connecteur central de la

ligne coaxiale est placé sur la face supérieure de l'antenne patch et donc il traverse le substrat de l'élément rayonnant.

Pour minimiser, la taille de l'antenne patch, nous utilisons un substrat dont la constante de permittivité diélectrique est relativement élevée. Nous avons utilisé un substrat « Taconic RF-60™ » dont les caractéristiques électriques sont : $\epsilon_r = 5.5$, une épaisseur de diélectrique $h = 2.8$ mm et des pertes diélectrique $\tan\delta = 0.0028$.

L'impédance d'entrée de l'antenne que l'on souhaite la plus proche possible de 50Ω en partie réelle, et nulle en partie imaginaire puisque cela correspond à l'impédance d'entrée de l'analyseur de réseau vectoriel.

V.1.4.3. Conception de l'antenne patch

Dans la littérature, il existe des formules analytiques pour déterminer les dimensions physiques de l'antenne patch. Ces formules comme toutes formules analytiques possèdent un domaine de validé (plan de masse infini, dimensions du connecteur d'alimentation négligeables...). Notre démarche de conception se décompose en deux étapes : une première étape a consisté à déterminer les dimensions approximatives de l'antenne patch en utilisant les formules analytiques.

La seconde étape a consisté à optimiser les dimensions de l'antenne patch (sans approximation) en utilisant un logiciel de simulation électromagnétique 3D Ansoft HFSS. Ce logiciel commercial de simulation électromagnétique 3D est basé sur la méthode des éléments finis. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser pour calculer des paramètres tels que les paramètres S, la fréquence de résonance et les champs électriques et magnétiques.

a) Première étape de la conception :

- Largeur W du patch:

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Par contre, elle joue un rôle sur l'impédance d'entrée de l'antenne et la bande passante à la résonance [51,53].

Pour permettre un bon rendement de l'antenne, une largeur W optimale est égale à:

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{1+\epsilon_r}{2}}} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Où : C = 3 x 10⁸ m/s.

- Longueur L du patch:

La longueur du patch détermine la fréquence de résonance fondamentale de l'antenne. En pratique, il ne faut pas oublier de retrancher deux fois la longueur ΔL qui correspond au débordement des champs (que l'on appelle aussi effet de bord).

$$L = L_{eff} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad \text{Eq.2.11}$$

$$\text{Et} \quad \Delta L = 0.412 h \left(\frac{\epsilon_{reff} + 0.3}{\epsilon_{reff} - 0.258} \right) \frac{\left(\frac{W}{h} \right) + 0.264}{\left(\frac{W}{h} \right) + 0.8} \quad \text{Eq.2.12}$$

$$\text{Avec :} \quad \epsilon_{reff} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Eq.2.13}$$

En utilisant ces formules nous obtenons les dimensions suivantes :

$$L = 7.005 \text{ cm} \quad \text{et} \quad W = 9.22 \text{ cm}$$

b) Seconde étape de conception :

En utilisant le logiciel électromagnétique 3D HFSS, les dimensions optimisées de l'antenne patch dans l'air obtenues sont les suivantes :

$$L = 7.01 \text{ cm} \quad \text{et} \quad W = 9.22 \text{ cm}$$

Les différences entre les formules analytiques et les résultats des simulations électromagnétiques 3D viennent principalement de la dimension finie du plan de masse et de la prise en compte précise des dimensions de l'alimentation.

V.2. Banc de mesure des caractéristiques électriques du béton :

Pour des fréquences < 1 GHz le béton peut être considéré comme un matériau homogène (dimension des granulats $\ll \lambda_g$).

La caractérisation du coefficient d'atténuation du béton est déduite de la comparaison de la mesure du coefficient de transmission entre deux antennes patch baignant dans l'air et baignant dans du béton.

Avant d'effectuer les deux types de mesure, nous avons calculé théoriquement en utilisant le logiciel HFSS le coefficient de transmission de deux antennes patch enfouies dans une boîte (40 x 60 x 100cm³) remplie soit d'air ou de béton sec ou de béton humide. Les caractéristiques électriques de ces deux types de bétons ont été prises dans la littérature [54,55].

Nous avons fixé la distance entre les deux antennes à $D = 20$ cm afin de travailler en champ lointain, sachant que la distance D est supérieure à $\frac{2d^2}{\lambda}$.

Avec : $\frac{2d^2}{\lambda} = 14$ cm et d représente la dimension maximale de l'antenne patch.

Les paramètres de simulation sont les suivants :

- Pour l'air : $\epsilon_{rAir} = 1$ et $\tan \delta_{Air} = 0$,
- Pour le béton sec: $\epsilon_{rBS} = 4.5$ et $\tan \delta = 0.0111$,
- Pour le béton humide ou saturé: $\epsilon_{rBH} = 7.5$ et $\tan \delta = 0.133$.

Nous présentons figure 2.16 l'environnement de simulation sous HFSS.

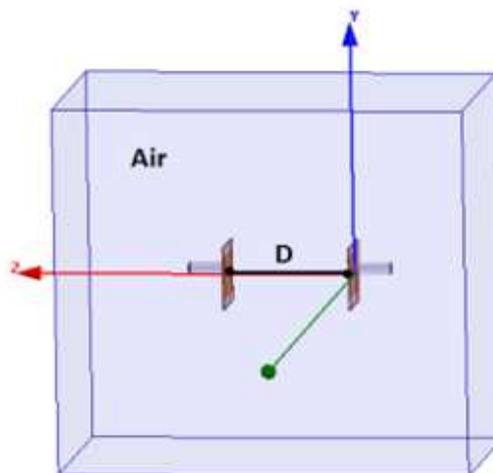


Figure 2.16: La configuration géométrique sur HFSS de 2 antennes patch noyées dans une boîte d'Air.

V.2.1. Etude de l'influence d'un volume d'air autour de l'antenne « boîtier d'air »:

Avant de noyer les antennes Patch dans le béton, on utilise un boîtier pour les protéger à l'intérieur du béton (voir figure 2.17). Les antennes patch sont optimisées pour un environnement air ($S_{11} = -23.18\text{dB}$). Le boîtier offre un espace air d'une épaisseur de 1 cm entre l'antenne et le béton. La figure 2.16 illustre le coefficient de réflexion d'une antenne patch noyée respectivement dans (a) l'air, (b) directement dans le béton sec ($\epsilon_{r\text{BS}}=4.5$), (c) directement dans le béton humide ($\epsilon_{r\text{BH}}=7.5$) et (d) dans le béton sec en utilisant un boîtier d'air.

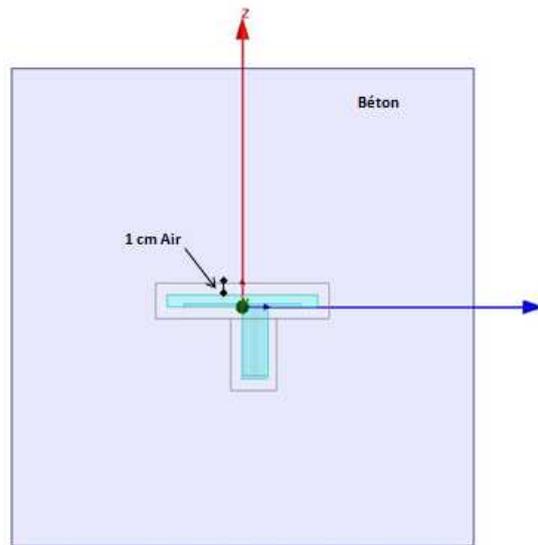


Figure 2.17: Boîtier d'air d'une antenne Patch noyée dans le béton (d).

Nous présentons sur la figure 2.18 l'influence du boîtier d'air sur les coefficients de réflexion et la fréquence de résonance. Les coefficients de réflexion S_{11} varient entre -6.36 dB pour une fréquence de résonance de 822 MHz avec une antenne patch noyée directement dans le béton sec, à -8.04 dB pour une fréquence de résonance de 748 MHz et une antenne patch noyée dans le béton humide et -16.61 dB pour une fréquence de résonance 857.5 MHz en utilisant une boîte d'air pour encercler l'antenne avant de la noyer dans le béton sec.

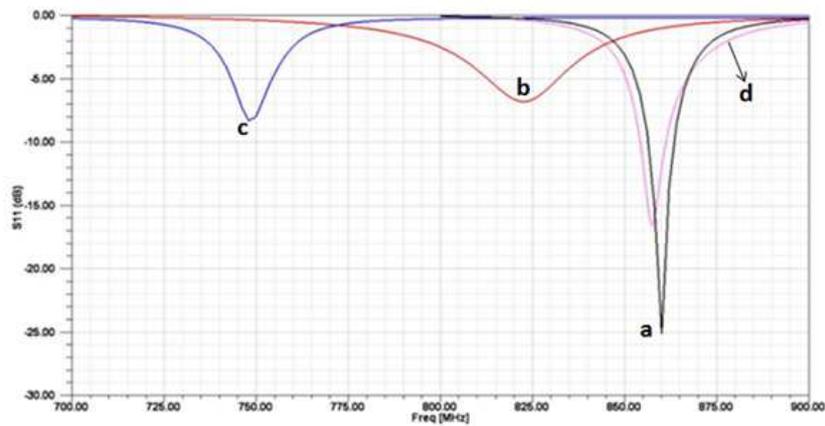


Figure 2.18: Coefficients de réflexion d'une antenne Patch dans (a) l'air, (b) le béton sec sans boîtier ($\epsilon_{rBS}=4.5$), (c) le béton humide sans boîtier ($\epsilon_{rBH}=7.5$) et (d) le béton sec avec un boîtier.

Pour le banc de mesure, nous allons utiliser le boîtier d'air pour étudier l'influence du type du béton (béton sec et béton humide) sur les coefficients de réflexion et de transmission.

V.2.2. Etude de l'influence du type de béton :

Nous présentons figures 2.19 et 2.20 l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion de l'antenne patch noyée soit dans du béton sec (fig. 2.19) pour un béton possédant aucune perte diélectrique et pour un béton présentant des pertes correspondant à $\tan\delta = 0.0111$ et 0.133 , soit dans du béton sec et humide (fig. 2.20). Pour cette étude, la permittivité diélectrique du béton est constante.

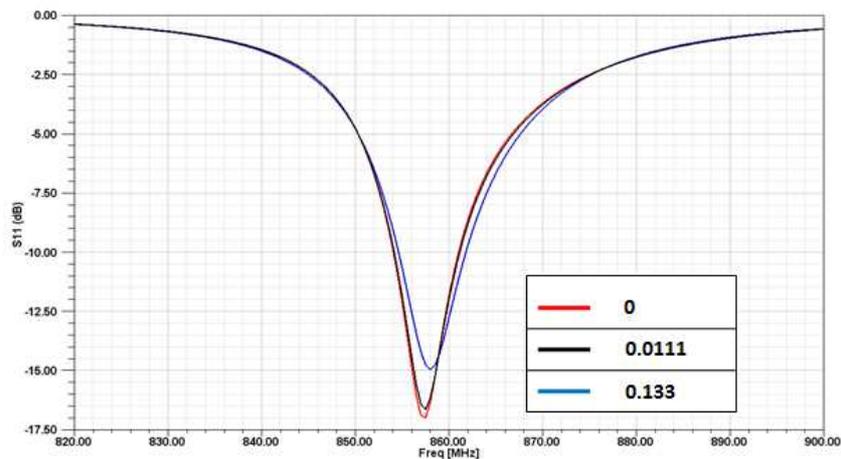


Figure 2.19: Module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies dans le béton sec en variant les tangentes de pertes.

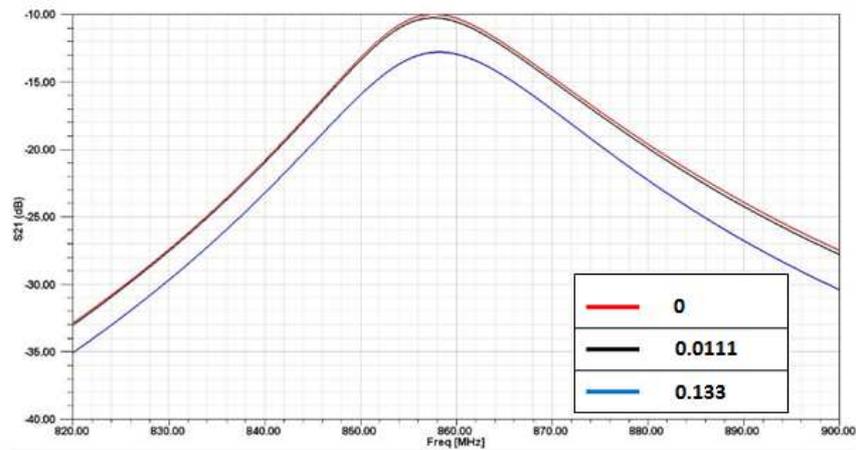


Figure 2.20: Module du coefficient de transmission en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies dans le béton sec en variant les tangentes de pertes.

D'après la figure 2.19, les pertes de l'environnement dans lequel l'antenne baigne influence peu le coefficient de réflexion de cette dernière. Par contre, on peut constater son influence sur l'évolution du coefficient de transmission entre deux antennes patch pour une permittivité relative égale à 4.5 (voir figure 2.20). On obtient un coefficient de transmission égale à (-10.1 dB) pour un milieu sans pertes, (-10.26 dB) pour une tangente de perte égale à 0.0111 et (-12.8 dB) pour une tangente de perte égale à 0.133.

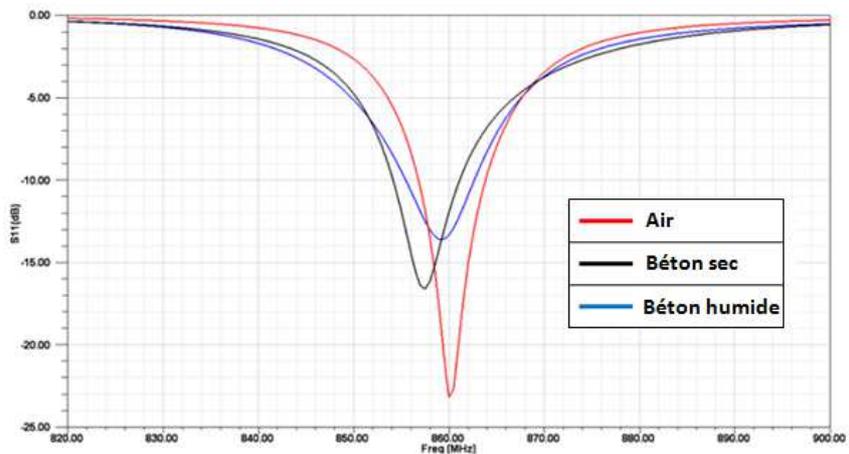


Figure 2.21 : Module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouis dans l'air, le béton sec et le béton humide (avec des boîtiers d'air).

D'après la figure 2.21, le type de béton (sec ou humide) possède une influence sur la fréquence de résonance de l'antenne Patch puisque ces deux types de béton possèdent des constantes diélectriques différentes. Nous obtenons une fréquence de résonance de 860Mz pour l'espace libre, de 857.5MHz pour le béton sec et à 859MHz pour le béton humide.

De plus, nous pouvons constater que le coefficient de réflexion d'une antenne noyée dans du béton sec ou humide évolue aussi. Nous obtenons une dégradation du coefficient de réflexion de l'antenne Patch croissante pour une augmentation de la constante de permittivité diélectrique du milieu dans lequel est noyée l'antenne.

Le coefficient de réflexion obtenu à la fréquence de résonance est de :

- $S_{11} = -23.18 \text{ dB}$ dans l'espace libre ($\epsilon_{rAir}=1$)
- $S_{11} = -16.62 \text{ dB}$ dans le béton sec ($\epsilon_{rBS}=4.5$ et $\tan\delta = 0.0111$)
- $S_{11} = -13.55 \text{ dB}$ dans le béton humide ($\epsilon_{rBH}=7.5$ et $\tan\delta = 0.133$)

Nous présentons dans la figure 2.22 le coefficient de transmission entre les deux antennes patch avec une distance de 20 cm. Nous considérons des pertes diélectriques pour les trois types de milieu à l'étude. Nous obtenons un coefficient de transmission égale à :

- $S_{21} = -10.14$ dans l'espace libre ($\epsilon_{rAir}=1$ et $\tan\delta = 0$)
- $S_{21} = -10.26 \text{ dB}$ pour le béton sec ($\epsilon_{rBS}=4.5$ et $\tan\delta = 0.0111$)
- $S_{21} = -12.86\text{dB}$ pour le béton humide ($\epsilon_{rBH}=7.5$ et $\tan\delta = 0.133$)

On peut constater l'évolution du coefficient de transmission des antennes noyées dans du béton sec ou du béton humide. Nous obtenons une dégradation du coefficient de réflexion de l'antenne Patch croissante pour une augmentation de la constante de permittivité diélectrique du milieu dans lequel est noyée l'antenne.

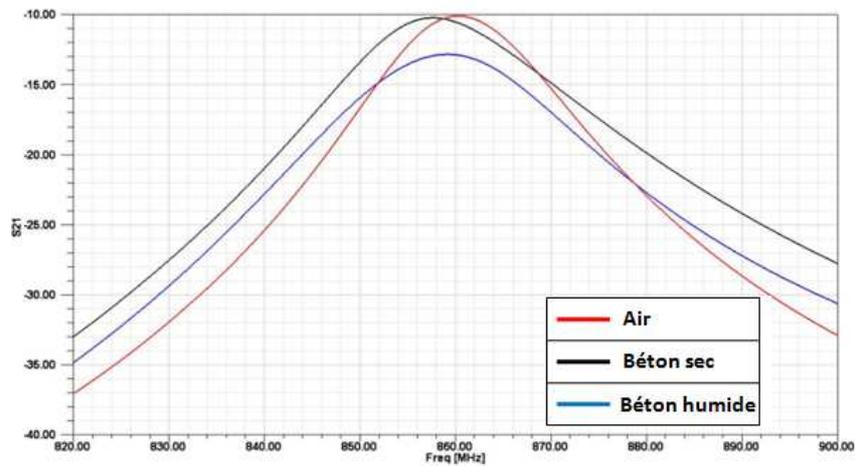


Figure 2.22: Module du coefficient de transmission en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies dans l'air, le béton sec et saturé.

Les antennes Patch étaient optimisées pour un environnement air d'où l'utilisation du boîtier air a permis de protéger les antennes patch de l'environnement béton. On peut remarquer l'évolution fréquentielle faible des coefficients de réflexion d'une antenne encapsulée et après noyée dans le béton contrairement à une antenne noyée directement dans le béton (fig. 2.18). Cependant, on constate toujours l'influence du type du béton (béton sec et béton humide) sur les coefficients de réflexion des antennes et leurs fréquences de résonance (fig. 2.21). Dans la partie suivante, nous allons optimiser une antenne patch pour un environnement béton.

V.2.3. Conception d'une antenne patch noyée dans du béton :

La figure 2.23 illustre le positionnement de l'alimentation coaxiale de l'antenne patch. L'alimentation de l'antenne se situe sur l'axe Y. La fréquence de résonance de l'antenne dépend principalement de la longueur L.

L'adaptation de l'antenne dépend de la position en y de l'alimentation et de la longueur L.

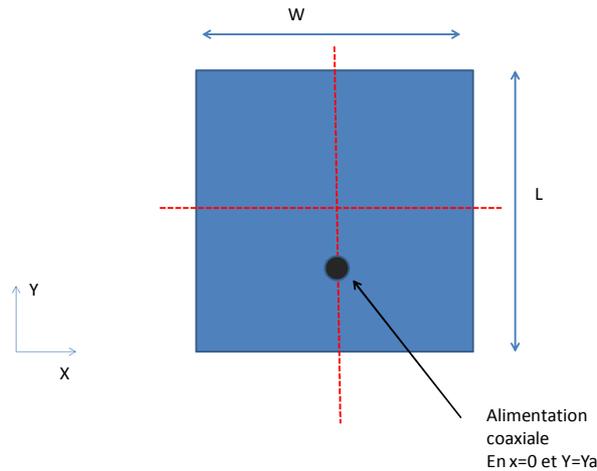


Figure 2.23: Positionnement de l'alimentation coaxiale de l'antenne.

La position de l'alimentation selon l'axe Y pour une antenne optimisée dans l'air est $Y_{air}=1.09$ cm avec : $W_{air}=9.22$ cm et $L_{air}=7.01$ cm.

Afin d'adapter l'antenne patch dans le béton sec, on optimise la position de l'alimentation et la longueur L. On commence par modifier la longueur L pour se rapprocher de la fréquence de résonance de 860 MHz. On obtient : $L_{béton}=6.701$ cm $W_{béton}=7.014$ cm. Ensuite, on modifie la position de l'excitation et on obtient une valeur intéressante pour $Y_{béton}=1.2$ cm. La figure 2.24 illustre le coefficient de réflexion $S_{11} = -18.8$ dB obtenu avec une antenne patch optimisée pour le béton.

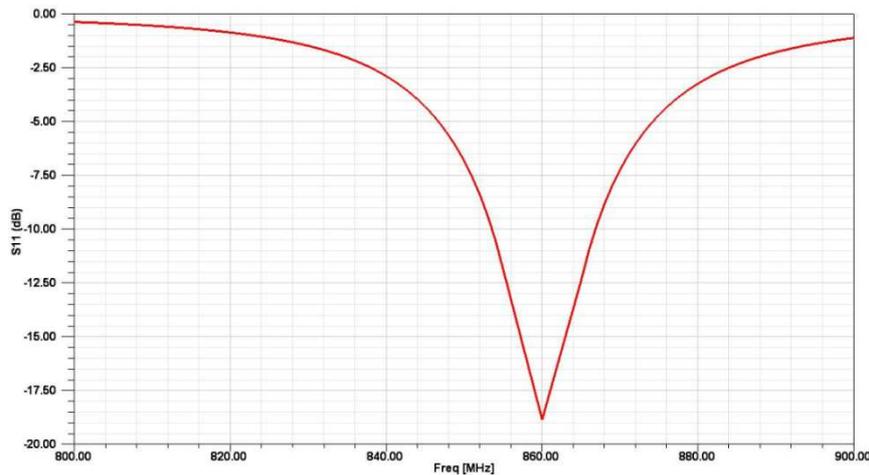


Figure 2.24 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour antenne optimisée et noyée dans du béton.

V.2.4. Réalisation des antennes patch :

Nous présentons sur les figures 2.25 et 2.27 la réalisation du banc expérimental : Les antennes Patch réalisées (sur un substrat Taconic RF-60™) optimisées pour le béton ont été placées dans des boîtes de polystyrène pour les protéger des conditions environnementales sévères et des sollicitations physiques, mécaniques et chimiques (forte humidité, corrosion des armatures, carbonatation, cycle gel/dégel...). Les dimensions extérieures de la boîte en polystyrène sont 15×15×3 cm³ afin d'obtenir un espace d'air d'une épaisseur de 1 cm entre l'antenne et le polystyrène. Un analyseur de réseau a été utilisé afin de mesurer les coefficients de réflexion et de transmission.

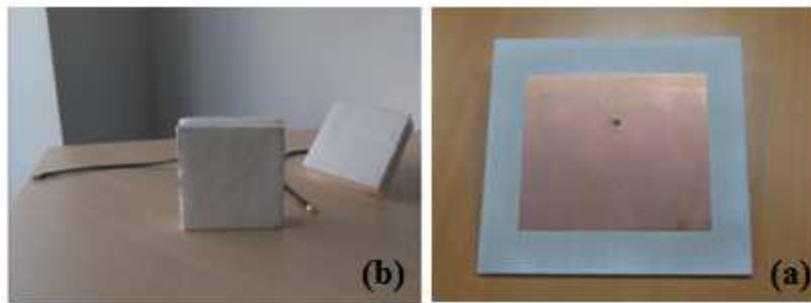


Figure 2.25: Antennes patch (a) sans boîtier (b) avec un boîtier en polystyrène

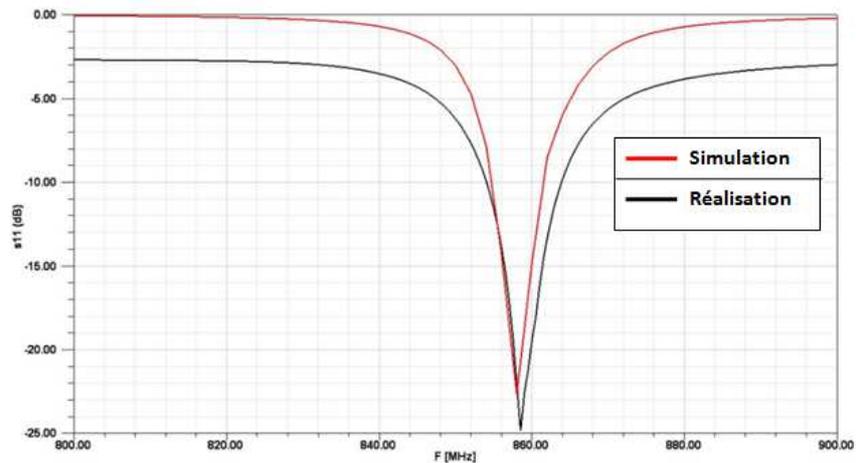


Figure 2.26 : Coefficients de réflexion des 2 antennes patch dans l'air en simulation et en réalisation en prenant compte du polystyrène.

Les deux antennes patch réalisées présentent un coefficient de réflexion de $S_{11} = -24.83 \text{ dB}$ dans l'air. En théorie, on obtient une valeur de $S_{11} = -22.68 \text{ dB}$ dans l'air (voir figure 2.26).

Un moule en plastique de dimension de $(55 \times 36 \times 20) \text{ cm}^3$ (L x W x H) est utilisé dans lequel nous coulons du béton standard avec un rapport eau/ciment (E/C) égale à 0.5. Avant de couler le béton, nous positionnons les 2 antennes patch au centre du moule plastique (cf.fig 2.27).

On coule du béton standard sur les antennes patch fixées et on commence par le vibrer. La vibration du béton permettra d'obtenir un matériau homogène et compact avec un minimum d'air et de vide.



Figure 2.27: Ecoulement du béton sur les deux antennes patch

Nous présentons sur la figure 2.28, l'évolution fréquentielle expérimentale du coefficient de réflexion d'une des deux antennes noyées dans le béton humide. On peut constater que les antennes sont moins bien adaptées en pratique ($S_{11} = -9.02 \text{ dB}$ pour le béton humide et un $S_{11} = -10.03 \text{ dB}$ pour le béton sec) qu'en théorie ($S_{11} = -18.8 \text{ dB}$ pour le béton sec et un $S_{11} = -10.88 \text{ dB}$ pour le béton humide).

On remarque un écart entre les valeurs expérimentales et les simulations obtenues dans le béton sec contrairement aux valeurs obtenues dans le béton humide et dans l'air. Cette différence est due aux valeurs des constantes diélectriques ($\epsilon_{rBS}=4.5$ et $\tan\delta = 0.0111$) utilisées pour optimiser l'antenne patch.

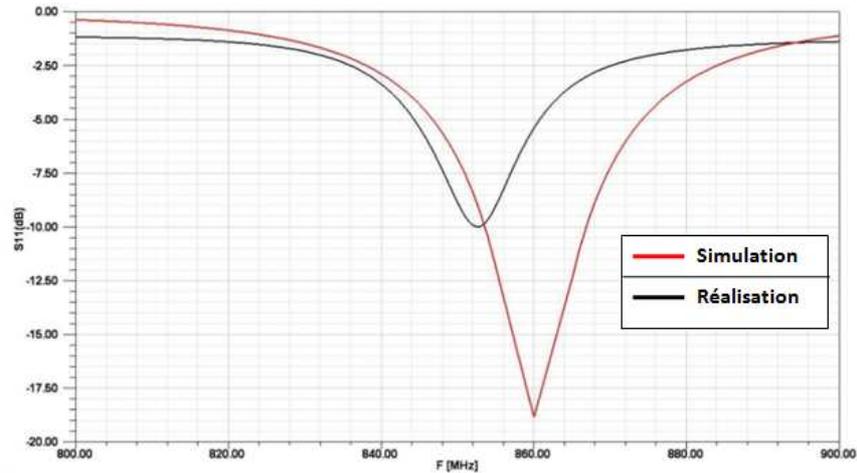


Figure 2.28: Coefficients de réflexion des antennes patch enfouies dans le béton sec en simulation et en réalisation.

Nous présentons dans la figure 2.29 l'évolution du coefficient de transmission entre les deux antennes noyées dans le béton en fonction du temps. Après l'écoulement du béton, le coefficient de transmission augmente au cours du temps durant la phase de séchage du béton.

La progression du coefficient de transmission dans le temps est de $S_{21} = -53.34$ dB immédiatement après l'écoulement du béton pour atteindre la valeur de $S_{21} = -26.53$ dB au bout de quatre mois de durcissement. Ces résultats confirment que la teneur d'eau diminue en fonction du durcissement du béton. Cette mesure pourrait être utilisée pour contrôler le durcissement du béton et servir de méthode pour identifier la période exacte de séchage du béton.

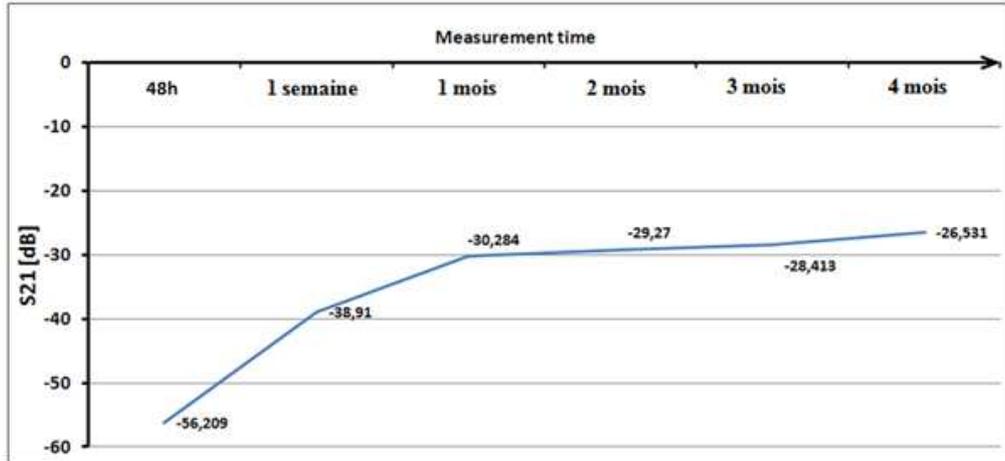


Figure 2.29: Coefficient de transmission des 2 antennes patch noyées dans le béton en fonction du temps

Pour déterminer expérimentalement l'atténuation du béton humide et sec, nous prenons le coefficient de transmission des deux antennes noyées dans l'air (-15.46 dB), dans le béton humide (-56.2 dB) et dans le béton sec (-26.46 dB). En considérant que le gain de l'antenne patch est identique quand elle est noyée dans le béton ou dans l'air (ce que nous avons vérifié théoriquement cf. annexe 2), nous pouvons considérer que l'atténuation du béton sec pour une distance de 20 cm est donc égale à 11 dB ce qui correspond à une atténuation de 55 dB pour 1m. L'atténuation du béton humide pour une distance de 20 cm est égale à 40.8 dB correspondant à une atténuation de 204 dB pour 1m.

V.3. Caractérisation électrique des propriétés électriques du béton :

Afin de déterminer les propriétés diélectriques du béton ϵ_r et $\tan\delta$. On effectue une rétro-simulation pour retrouver les résultats expérimentaux. Pour ce faire, nous faisons évoluer la permittivité relative et la tangente de perte du béton afin de retrouver la même fréquence centrale obtenue après l'écoulement et le durcissement du béton et l'évolution fréquentielle du coefficient de transmission compatibles avec les résultats expérimentaux.

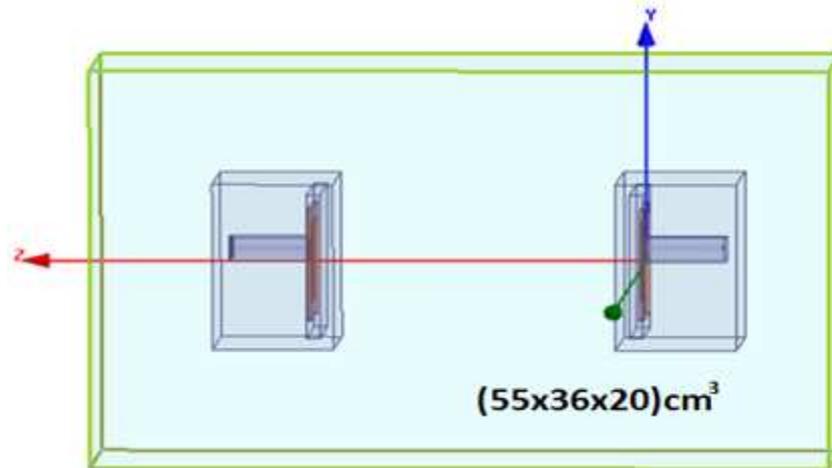


Figure 2.30: Configuration géométrique des 2 antennes patch noyées dans le béton.

Nous présentons dans les figures 2.31 et 2.32 la comparaison des résultats théoriques obtenus après rétro-simulation pour les paramètres de béton suivant :

$$\epsilon_r = 5.5 \quad ; \quad \tan\delta = 0.2$$

On obtient avec $\epsilon_r = 5.5$ sans pertes diélectriques la fréquence centrale de 853.5MHz. On obtient en simulation un coefficient de réflexion égale à (-10.42 dB) et en expérimentale (-10.03 dB) comme illustré sur la figure 2.31.

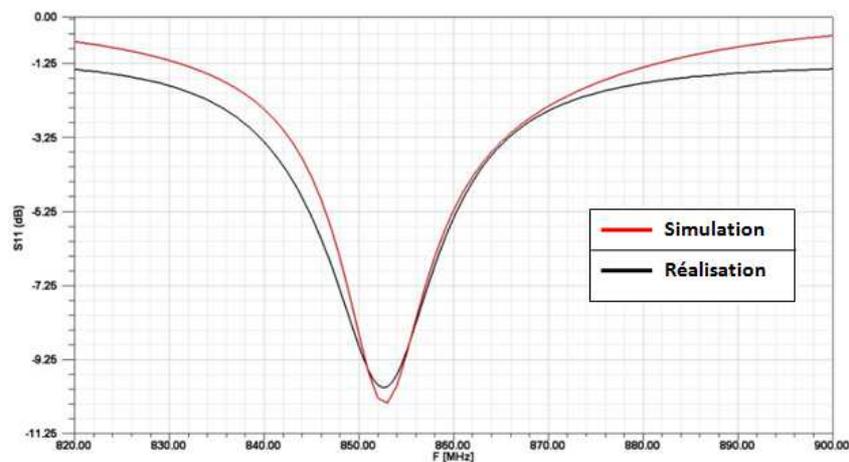


Figure 2.31: Coefficients de réflexion des 2 antennes patch en simulation et en réalisation.

Le calcul de la permittivité relative réalisé par rétro-simulation ne prend pas en compte les pertes du diélectrique. Afin de déterminer la valeur tangente des

perdes, on optimise cette valeur jusqu'à l'obtention d'une courbe S_{21} compatible avec la pratique avec ($S_{21} = -26.53$ dB).

On obtient avec $\epsilon_r = 5.5$ et $\tan\delta = 0.2$ une courbe S_{21} compatible avec l'expérimentale.

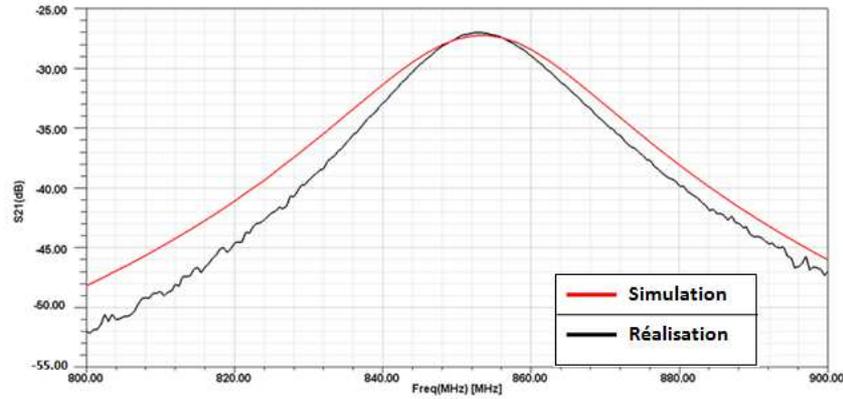


Figure 2.32: Coefficients de transmission des 2 antennes patch en simulation et en réalisation.

En complément, une étude a été réalisée pour analyser l'influence des armatures présentes dans le béton armé et leurs emplacements vis-à-vis des antennes sur les coefficients de réflexion et de transmission.

VI. Influence des armatures :

En pratique, les paramètres géométriques des armatures en treillis dans une structure de béton de calibre variant, certains des effets de ces paramètres sont étudiés dans cette partie.

VI.1. Positionnement des armatures :

On positionne l'antenne patch derrière, devant et entre les armatures afin de déterminer la meilleure position de nos antennes vis-à-vis des armatures dans une boîte d'air (fig. 2.33). Les résultats sont affichés sur les figures 2.34 et 2.35. On peut constater que positionner l'antenne entre ou devant les armatures permet de ne pas perturber la transmission et possède une faible influence et transmission de nos antennes.

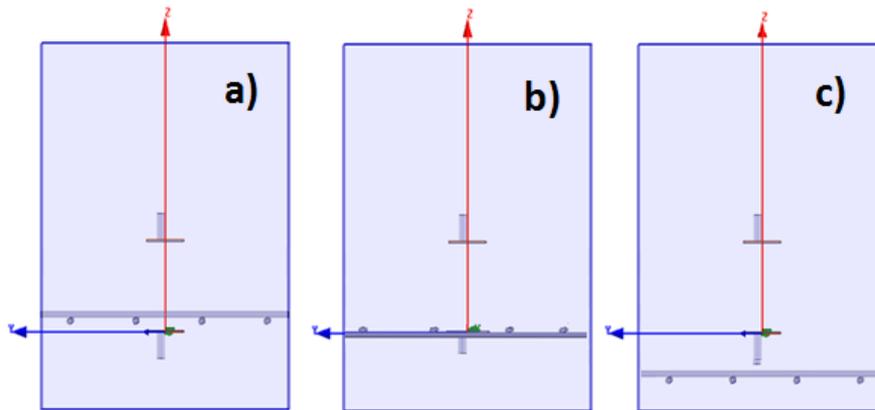


Figure 2.33: Configuration géométrique d'antenne patch positionnée a) derrière b) entre et c) avant les armatures dans une boîte d'air.

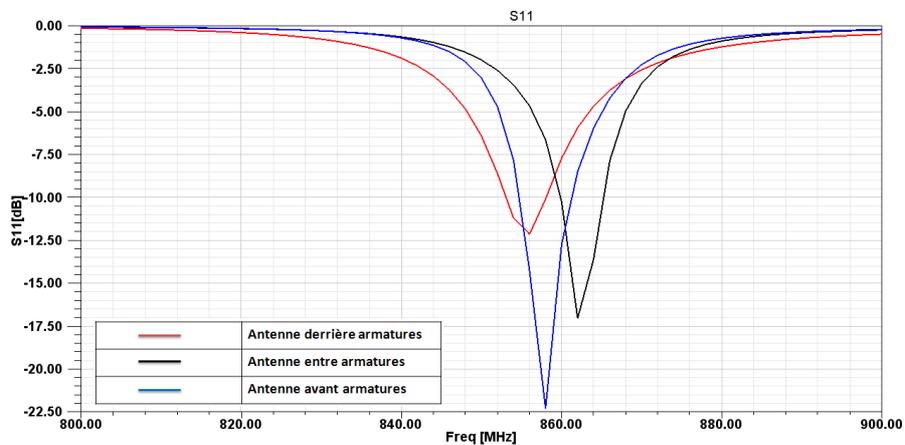


Figure 2.34: Coefficients de réflexion pour différentes positions des antennes patch dans une boîte d'air.

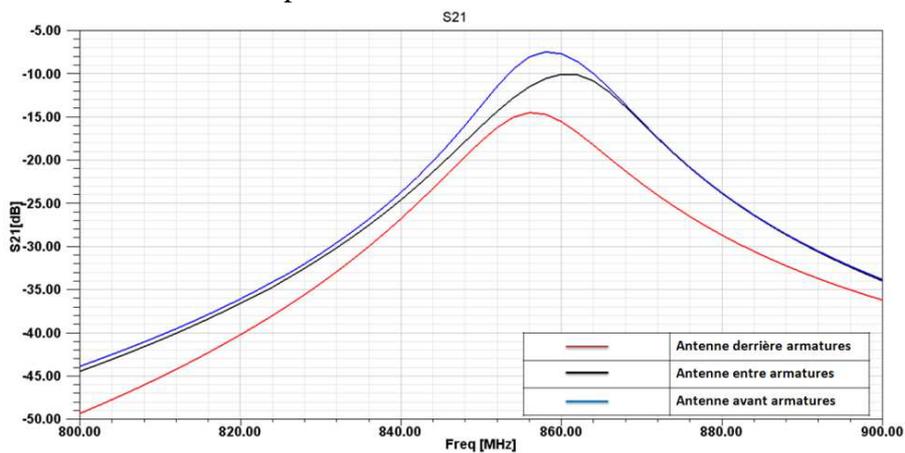


Figure 2.35: Coefficients de transmission pour différentes positions des antennes patch dans une boîte d'air.

VI.2. Dimension des grilles métalliques:

On a étudié l'influence de certains paramètres critiques de grilles sur la transmission des ondes électromagnétiques entre deux antennes Patch optimisées pour le béton (fig. 2.24). La distance D entre les deux antennes est égale à 20 cm. Les armatures sont noyées dans le béton (sans perte) à une profondeur d égale à 4 cm. La première antenne Patch est encapsulée dans une boîte d'air de dimension $(13 \times 13 \times 1) \text{ cm}^3$ et ensuite fixée entre deux fer-ronds et noyée dans le béton. La deuxième antenne est laissée dans l'air comme illustrée sur la figure 2.36.

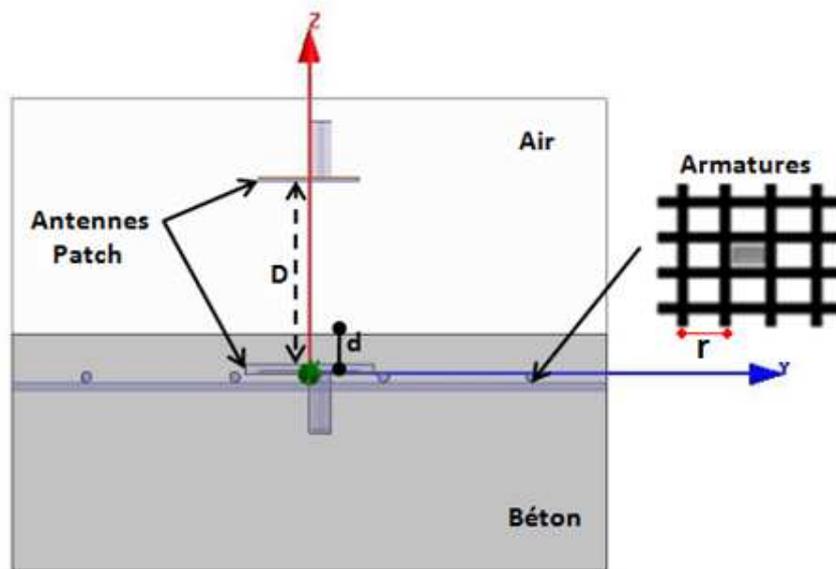


Figure 2.36: Configuration géométrique des 2 antennes patch, la première attachée aux armatures dans le béton et la deuxième dans l'air

On étudie les coefficients de réflexion et de transmission pour des dimensions de grilles (r) qui varient entre : 11 cm, 15 cm et 20 cm. Le diamètre du fer-rond est de 10 mm. On peut constater l'influence des grilles métalliques sur le coefficient de réflexion pour les dimensions des armatures (voir figure 2.37). Le coefficient de réflexion S_{11} varie entre -15.49 dB pour une longueur de grille de 11cm à -16.24 dB pour une longueur de grille de 15cm.

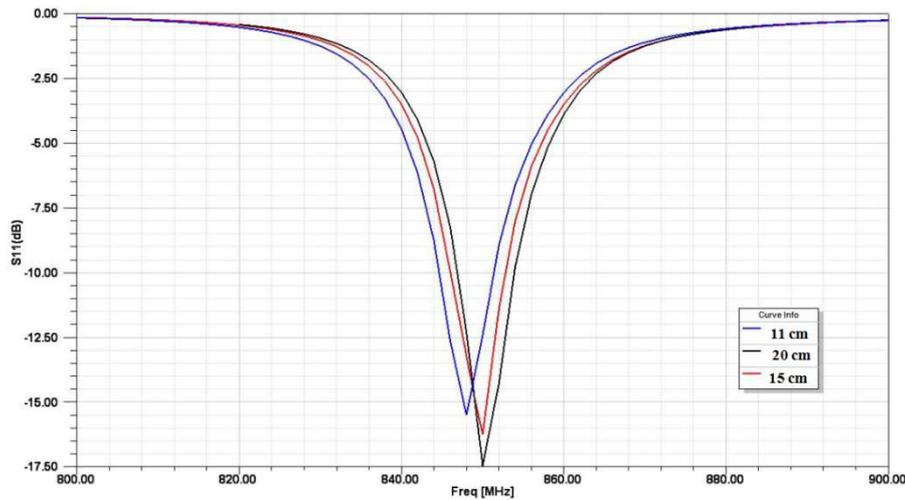


Figure 2.37 : Coefficients de réflexion à 860MHz pour des longueurs de grilles : 11, 15 et 20cm.

Le coefficient de transmission S_{21} varie entre -15.12 dB pour une longueur de grille de 11cm à -14.72 dB pour une longueur de grille de 15cm. Sachant que le coefficient de transmission de l'antenne sans armatures dans le milieu (air – béton) est égale à -14.27 dB. Les résultats sont illustrés sur le tableau 2.3.

Dimensions des Grilles (r)	S_{21} (dB) Air- Béton Armé
11 cm	-15.12
15 cm	-14.72
20 cm	-14.76

Tableau 2.3 : Coefficients de transmission à 860MHz pour des longueurs de grilles : 11, 15 et 20cm.

VI.3. Diamètre des fer-ronds:

On considère la configuration géométrique des 2 antennes patch illustrée sur la figure 2.36. Pour des grilles de longueur de 15 cm, on considère les diamètres suivants : 4, 8, 12 et 16 mm. Les résultats obtenus sont affichés sur le tableau 2.4.

Diamètre des fer-ronds (mm)	S_{21} (dB) Air - Béton armé
4	--14.54
8	-14.67
12	-14.78
16	-14.89

Tableau 2.4: Coefficients de transmission à 860MHz pour des fer-ronds de diamètre de 4mm, 8mm, 12mm et 16mm.

Les coefficients de transmission S_{21} varient entre -14.54 dB pour un diamètre de fer-ronds de 4 mm à -14.89 dB pour un diamètre de fer-ronds de 16 mm. Sachant que le coefficient de transmission de l'antenne sans armatures dans le milieu (air – béton) est égale à -14.27 dB. On constate que le diamètre des fer-rond a un effet négligeable sur les coefficients de transmission à la fréquence 860MHz.

VII. Conclusions :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents paramètres influant sur l'atténuation de la propagation de l'onde électromagnétique au sein du béton: la fréquence, l'humidité, l'hétérogénéité et la présence des armatures. Nous avons présenté aussi les différentes techniques utilisées pour la caractérisation du béton. A travers cet état de l'art, nous avons mis en œuvre la méthode de mesure qui semble la mieux adaptée pour déterminer les propriétés diélectriques du béton ϵ_r et $\tan\delta$.

Par la suite, nous avons étudié l'influence de l'humidité du béton sur les coefficients de réflexion et de transmission de deux antennes Patch noyées dans le béton. La réalisation d'une communication entre ces deux antennes dans une boîte de béton standard a permis de déterminer la permittivité relative et la tangente de pertes du béton par rétro-simulation.

Enfin, nous avons étudié l'influence des dimensions des armatures et la position de l'antenne vis-à-vis du ferrailage sur la transmission des ondes électromagnétiques dans le milieu (air – béton armé) qui nous a permis de positionner l'antenne entre les armatures.

Le chapitre suivant a pour objectif d'étudier la configuration du réseau de capteurs sans fil noyées dans le béton et la réalisation d'un prototype de ce réseau de capteurs qui sera déployé à l'intérieur d'une structure en béton armé.

Chapitre 3

Configuration du Réseau de Capteurs sans fil

Sommaire :

I. Introduction	85
II. Choix de la topologie du réseau de capteurs noyé dans le béton	85
II.1. Calcul de la portée d'une communication radio entre des nœuds de capteur noyé dans du béton	87
II.2. Choix de la topologie du réseau de capteur et de l'antenne du nœud de capteur	91
II.3. Simulation des réseaux d'antennes	95
III. Consommation et durée de vie des nœuds de capteurs	97
IV. Etudes des différents capteurs pour étudier les déformations de l'édifice en béton	102
IV.1. Déformations et contraintes	102
IV.1.1. Définitions	102
IV.1.2. Tenseur des contraintes, tenseur des déformations	103
IV.2. Etat de l'art des capteurs de déformation	105
IV.2.1. Les capteurs à cordes vibrantes	105

IV.2.2. Les capteurs à fibre optique	106
IV.2.3. Les jauges de contraintes	107
IV.2.3.1. Principe	107
IV.2.3.2. Montage de pont de Wheatstone	108
IV.2.3.3. Exigences de courant pour des configurations de jauge.....	111
IV.2.4. Récapitulatif des performances des capteurs de déformation	112
V. Capteurs de température et d'humidité du béton	114
V.1. Température et humidité internes du béton	114
V.2. Conception de la boîte d'encapsulation	114
V.3. Mesure de la température et de l'humidité du béton	116
VI. Réseau de capteurs noyés dans un édifice « Totem » en béton armé	118
VI.1. Introduction	118
VI.2. Etude de l'influence de la taille des capteurs sur une structure en béton	119
VI.2.1. Contrainte équivalente de Von Mises	119
VI.2.2. Modèle de simulation	120
VI.2.3. Etude de l'influence de la taille des capteurs	121
VI.3. Dimensionnement de la structure en béton armé « TOTEM »	122
VI.3.1. Introduction	122
VI.3.2. Modes de fondations des ouvrages de génie civil	123
VI.3.3. Influence des terrains sur le choix des fondations.....	123
VI.3.4. Méthode de réseau	125
VI.3.4.1. Généralités	125
VI.3.4.1. Calcul du massif pour la structure « TOTEM »	126
VII. Conclusions	129

I. Introduction :

Dans ce chapitre, on commence par élaborer un pré-calcul des différentes portées des capteurs dans l'espace libre et dans le béton afin de déterminer la topologie du réseau de capteurs sans fil adéquate pour les noyer dans le béton armé. Ce premier calcul nous permettra de déterminer le choix de l'antenne pour notre communication.

Ensuite, nous présentons un état de l'art des différents capteurs de contraintes utilisés pour étudier les déformations du béton. Un capteur de température et d'humidité sans fil est noyé dans le béton afin d'étudier l'évolution de la température et de l'humidité interne du béton en fonction du temps.

Enfin, nous présentons des résultats des simulations mécaniques du réseau de capteurs à l'intérieur du béton pour étudier l'influence de la taille des boîtiers de capteurs sur une structure en béton armé.

II. Choix de la topologie du réseau de capteurs noyés dans le béton:

La topologie d'un réseau de capteurs sans fil consiste en un nombre très grand de capteurs capables de s'adapter à l'environnement dans lequel ils se trouvent et aux changements imprévus comme l'ajout, l'épuisement ou la destruction d'un nœud. Cette adaptation est plus ou moins facile selon le type de configuration réseau. L'architecture des réseaux de capteurs n'a pas de structure fixe, pour sa taille et pour sa forme, elle dépend des applications et des techniques utilisées pour acheminer l'information des capteurs à la station de base « Sink » (le puits) [56].

Il existe 4 grandes familles de réseaux de capteurs :

a) Le réseau étoile :

Dans ce réseau, un nœud central a la responsabilité de contrôler et de coordonner les nœuds capteurs qui communiquent exclusivement avec lui comme illustré dans la figure 3.1. Le coordinateur central est en charge de relayer les données vers d'autres systèmes. L'intérêt de cette architecture est sa limitation du transport de donnée entre le nœud et puits [57]. Par contre si le nœud est loin du puits soit il y faudra une consommation plus importante pour atteindre le puits puisque la puissance d'émission devra être plus importante (en supposant que l'antenne n'est pas reconfigurable) ce qui aura un impact sur la durée de vie du nœud et donc du réseau de capteurs. Ce type de réseau est peu modulable.

b) Le réseau maille « Mesh » :

Le réseau Mesh est constitué d'un ensemble de nœuds reliés les uns aux autres. Chacun transmet l'information à un voisin en empruntant un des (nombreux) chemins possibles comme illustré figure 3.1. Ils s'adaptent rapidement vis-à-vis de l'environnement. Cette caractéristique permet de maintenir le fonctionnement du réseau en cas de panne d'un composant; elle le rend donc à la fois plus robuste mais aussi plus flexible quant à la variation du nombre des nœuds [58]. Ce type de réseau est dédié à des applications de communications militaires et à la surveillance industrielle [59].

c) Le réseau arbre « Cluster»:

Ce réseau de nœuds de capteurs est souvent constitué de plusieurs milliers d'éléments. Pour simplifier la gestion du réseau comme l'affectation des adresses, et optimiser la consommation d'énergie, les nœuds sont regroupés dans des clusters comme illustré dans la figure 3.1. Les nœuds qui sont regroupés ensemble dans un cluster seront capables de communiquer facilement les uns avec les autres. On trouve plusieurs stratégies de groupement parmi lesquelles, les nœuds sont organisés en une hiérarchie en fonction de la portée de communication et de leur proximité. Un chef de cluster est élu pour effectuer plusieurs tâches avec la possibilité d'être changé s'il tombe en panne ou s'il arrive à sa limite d'énergie [60]. Toutes les communications de tous les nœuds seront effectuées par l'intermédiaire du chef du cluster auquel ils appartiennent. Les algorithmes de formation de clusters peuvent être centralisés ou distribués.

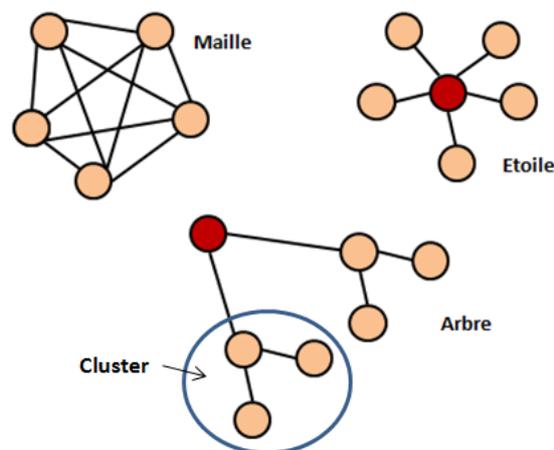


Figure 3.1 : Différentes topologies de réseau de capteurs sans fil.

Pour déterminer la topologie du réseau, il est nécessaire de déterminer le bilan de liaison entre deux nœuds, puisque comme nous l'avons vu au chapitre 2; l'atténuation dans le béton est importante (environ 55 dB par mètre) et la consommation d'énergie d'un nœud de capteur communicant sans fil dépend principalement du module radio.

II.1. Calcul de la portée d'une communication radio entre des nœuds de capteur noyés dans du béton :

Les ondes radio se propagent de l'antenne d'émission à l'antenne de réception de diverses manières [61]:

- par onde directe, partant de l'émetteur et arrivant sur le récepteur sans rencontrer d'obstacles naturels (montagnes, couches atmosphériques) ou artificiels (immeubles...).
- par onde réfléchie, lorsque l'onde rencontre un obstacle et est renvoyée dans sa totalité, ou en partie, dans une direction différente.

Le schéma de principe d'une liaison hertzienne est dans le cas général le suivant:

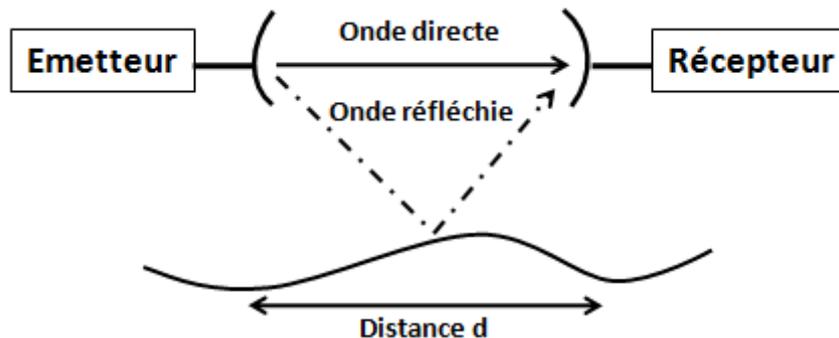


Figure 3.2: Schéma de principe d'une liaison hertzienne

Quand on cherche à effectuer une transmission sans fil, on veut pouvoir évaluer la puissance captée par un récepteur en fonction de la puissance envoyée par un émetteur à une distance donnée.

Si on ne prend en compte que le trajet direct et l'atténuation du milieu dans lequel l'onde se propage, on peut calculer la puissance reçue P_r à l'entrée du récepteur à partir de la formule de Friis pour une propagation en espace libre:

$$P_r = P_e \cdot G_e \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha} \quad \text{Eq.3.1}$$

Avec :

- P_r : Puissance reçue par le récepteur en Watts
- P_e : Puissance envoyée par l'émetteur en Watts
- d : Distance entre émetteur/récepteur
- G_r : Gain de l'antenne de réception
- G_e : Gain de l'antenne d'émission.
- α : Perte de l'environnement.

Si on exprime la puissance en dBm et les gains en dB, la formule de Friis devient :

$$P_r = P_e + G_e + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) - \alpha \quad \text{Eq.3.2}$$

Avec :

- P_e et P_r en dBm
- d en mètres
- f en Hz
- G_r et G_e en dB
- α : Perte de l'environnement (béton) en dB.

Dans notre cas, l'atténuation du milieu de propagation ne peut pas être négligée puisque l'onde radio est atténuée de 55 dB pour une distance d'un mètre dans le béton sec et de 204 dB pour une distance de 1 m dans le béton humide.

Le calcul de la portée d'une communication radio dépend du niveau de puissance reçue minimal (P_{rmin}) correspondant au niveau de la puissance de bruit du système puisqu'il faut obligatoirement que le niveau du signal reçu soit supérieur à ce niveau minimal.

En supposant que le niveau de puissance reçue minimal est fixe, pour augmenter la portée de la liaison (D_{max}), nous pouvons donc soit augmenter le niveau de la puissance d'émission, soit augmenter le gain des antennes d'émission réception, comme on peut le remarquer par la formule suivante :

$$D_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_e \cdot G_e \cdot G_r}{\alpha \cdot P_{rmin}}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Si on augmente le niveau de la puissance d'émission, la consommation d'énergie va augmenter et donc cela va diminuer la durée de vie du nœud de capteur.

Le gain d'une antenne est lié à sa directivité, donc si le gain de l'antenne augmente, sa directivité augmente et donc la couverture spatiale diminue et la taille de l'antenne augmente.

Le choix des antennes joue un rôle sur l'optimisation de la communication entre deux nœuds de capteur mais aussi sur le choix de la topologie du réseau à mettre en place.

Afin de déterminer le type d'antenne d'un nœud de capteur, nous calculons dans un premier temps la portée d'une communication entre deux nœuds noyés soit dans du béton, soient en espace libre et ensuite pour le premier nœud noyé dans le béton à une profondeur de 4 et 20 cm en situant le deuxième nœud dans l'air comme illustré dans la figure 3.5.

Pour ces calculs, nous fixons la fréquence de travail à 860 MHz (bande ISM et pour laquelle nous avons déterminé les paramètres du béton (cf. chapitre 2) et nous faisons l'hypothèse que le minimum du niveau de puissance reçu est égal à -110 dBm. On utilise des gains d'antenne égaux à 4 dB et 1 dB qui correspondent respectivement aux gains d'une antenne patch et d'une antenne dipôle.

Le tableau 3.1 ci-dessous récapitule les différents résultats :

Milieu de propagation	D (m) avec $G_1 = G_2 = 4$ dB	D(m) avec $G_1 = G_2 = 1$ dB
Béton sec	0.96	0.88
Béton humide	0.33	0.3
Air	2149.16	1077.13
20cm de béton sec	605.71	303.5
4 cm de béton sec	1668.2	836.12
4 cm de béton humide	840	421

Tableau 3.1 : Portée maximale de la communication entre deux nœuds avec des gains d'antennes de 4 et 1 dB dans des milieux de propagation différents.

D'après ce premier calcul, nous pouvons conclure qu'une topologie de réseau capteurs en maille n'est pas appropriée pour notre étude, car il faudrait un nombre très important de nœud pour remonter une information puisque la portée

maximale dans le béton est inférieure au mètre. Pour les mêmes raisons, une topologie de réseau de capteur en étoile n'est pas envisageable. Par contre si on considère une topologie de réseau de capteurs de type « arbre » dans laquelle un certain nombre de nœuds de capteur noyés dans le béton communiquent avec un puits local se situant en dehors du béton et les différents puits locaux communiquent à la station de base comme illustré figure 3.3. Cette topologie permettra d'optimiser la consommation d'énergie et d'obtenir une durée de vie plus longue.

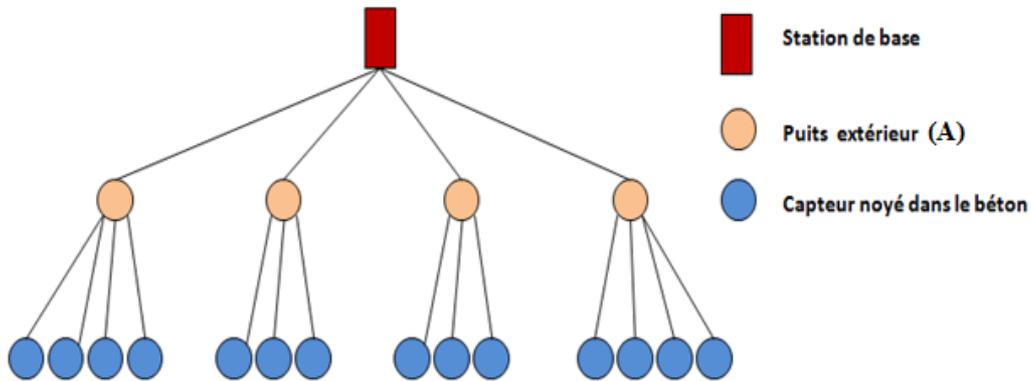


Figure 3.3 : Topologie réseau de capteurs sans fil choisie

Dans ce type de configuration, l'utilisation d'étiquette ou RFID passive peut être envisageable. Dans ce cas le puits (A) joue le rôle de balise pour les étiquettes passives noyées dans le béton, comme illustrée dans la figure 3.4. Cette solution permettrait au niveau du nœud de ne pas consommer d'énergie pour la communication, puisque l'étiquette passive est télé-alimentée par la balise (lecteur RFID) pour la communication des données entre l'étiquette et la balise.

Pour se faire, le lecteur RFID envoie une onde électromagnétique porteuse d'un signal jusqu'aux étiquettes qu'il veut identifier. Celles-ci réagissent au signal envoyé par le lecteur en lui renvoyant l'information qu'il a demandé (voir figure 3.4).

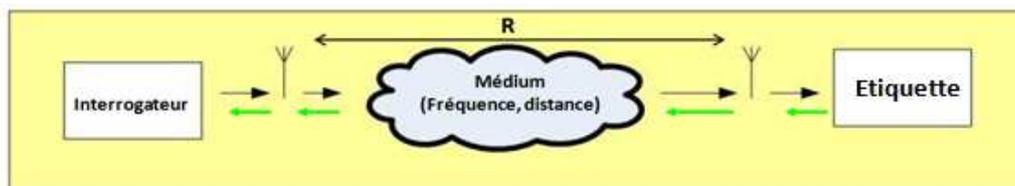


Figure 3.4 : Schéma du bilan de liaison d'une étiquette RFID passive

Pour déterminer la portée de la communication, il faut tout d'abord connaître la distance maximale acceptable pour télé-alimenter l'étiquette. En supposant que le seuil de télé-alimentation est d'environ -20 dBm (exemple d'une étiquette Imping Monza 5) et pour un gain d'antenne de 4 dB pour le lecteur RFID et de 1 dB pour l'étiquette, nous obtenons une distance maximale de 40 cm si l'étiquette se situe dans le béton sec et 15 cm si l'étiquette se situe dans le béton humide.

RFID Passives	R (m) avec $G_{\text{reader}}=4$ dB et $G_{\text{tag}}=1$dB
Béton sec (En liaison directe)	0.4
Béton humide (En liaison directe)	0.15
4 cm de béton sec	11.8
4 cm de béton humide	5.9
Air	15

Tableau 3.2 : Portée maximale de la communication d'une étiquette RFID passive avec un gain d'antenne de 1 dB dans des milieux de propagation différents.

Au vu de ces calculs et de la topologie du réseau, l'antenne du nœud de capteur peut être une antenne rayonnant dans un demi-plan, puisque le puits se situe à l'extérieur du béton. Une solution possible d'antennes pour les nœuds serait une antenne patch.

II.2. choix de la topologie du réseau de capteur et de l'antenne du nœud de capteur.

Tous les calculs précédents ne prennent pas en compte la présence des armatures métalliques. Au vu des résultats de la portée maximale (cf. table 3.1) et des

résultats obtenus au chapitre 2 concernant les performances d'une liaison radio avec et sans armature métallique, nous avons choisi de positionner les nœuds de capteur au niveau des armatures. Nous utiliserons les armatures pour fixer les nœuds de capteur afin qu'ils restent fixes pendant le coulage du béton.

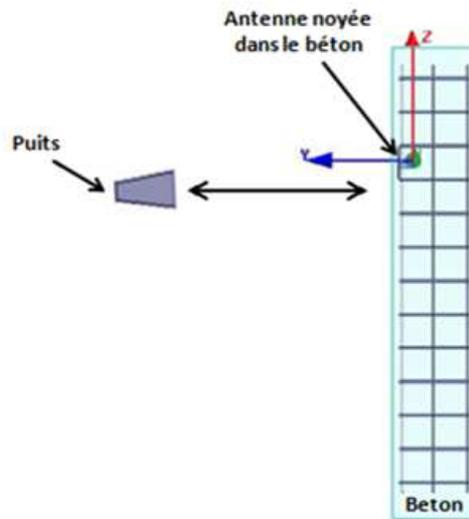


Figure 3.5: Topologie réseau de capteurs local

Nous présentons dans la figure 3.5 la topologie du puits local et des nœuds associés pour un grand édifice, comme par exemple un pilier de pont. Nous présentons sur cette figure l'orientation du lobe principal de l'antenne au niveau du puits et au niveau d'un nœud. Nous pouvons constater que la direction des lobes principaux de l'antenne d'émission et de réception pour une communication entre le nœud et le puits ne sont pas en face à face comme dans l'hypothèse de nos calculs effectués dans le paragraphe 1 de ce chapitre. Pour simuler au mieux la réalité, nous effectuons des simulations électromagnétiques 3D comme illustré dans la figure 3.7. Le nœud de capteur est composé d'une antenne patch. Il est situé à 4 cm de la surface du béton fixé aux armatures. Le puits se situe parallèle à la surface de l'édifice en béton et l'antenne utilisée est un cornet de gain 7 dB et de directivité 8 dB.

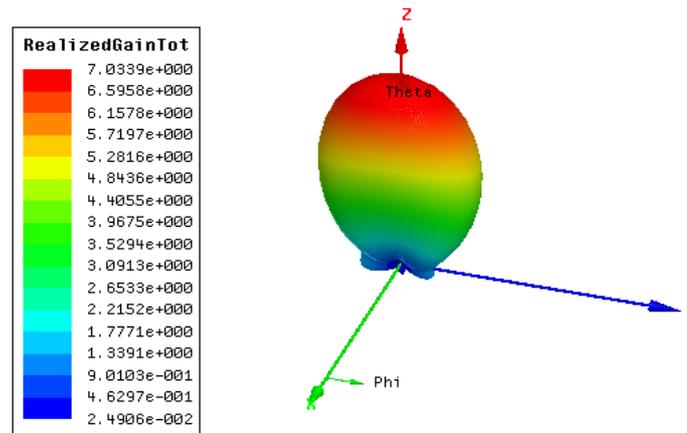


Figure 3.6: Gain réalisé de l'antenne Cornet dans l'air.

Nous présentons dans la figure 3.8 le coefficient de transmission (S21) entre l'antenne patch située au niveau du nœud noyée dans 4 cm du béton et l'antenne au niveau du puits pour une distance du puits de 2 m selon l'axe Z par rapport à l'antenne du nœud.

La portée maximale de cette communication est de 2276.5 m. (en supposant $P_{rmin} = -110$ dBm)

En utilisant la même configuration, nous calculons la distance maximale de télé-alimentation d'une étiquette RFID passive. Nous obtenons une distance de 11.8 m pour le béton sec et 5.9 m pour le béton humide.

Nous pouvons donc en conclure que cette configuration de réseau de capteur noyé dans le béton humide n'est pas adaptée à des étiquettes RFID passive pour la surveillance des ouvrages d'art pendant la phase de construction (béton humide). Pour utiliser des étiquettes passives, il faut que la direction de l'antenne et du puits soit sur le même axe ou qu'elle soit proche (ne pas dépasser 6 m). Cette solution n'est envisageable que si le puits est mobile le long de la surface de l'édifice, ce qui n'est pas une solution facile à réaliser.

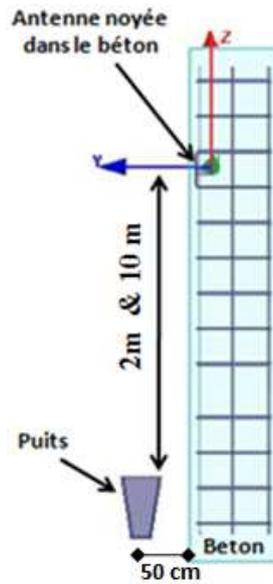


Figure 3.7 : Topologie de réseau de capteur local

Nous présentons dans la figure 3.8 l'évolution du coefficient de transmission entre l'antenne du puits se situant le long de l'édifice et l'antenne du nœud noyée dans le béton à une épaisseur de 4 cm du bord. Les coefficients de transmission varient entre un $S_{21} = -29.42$ dB pour une distance de 2 m à un $S_{21} = -43.5$ dB pour une distance de 10 m.

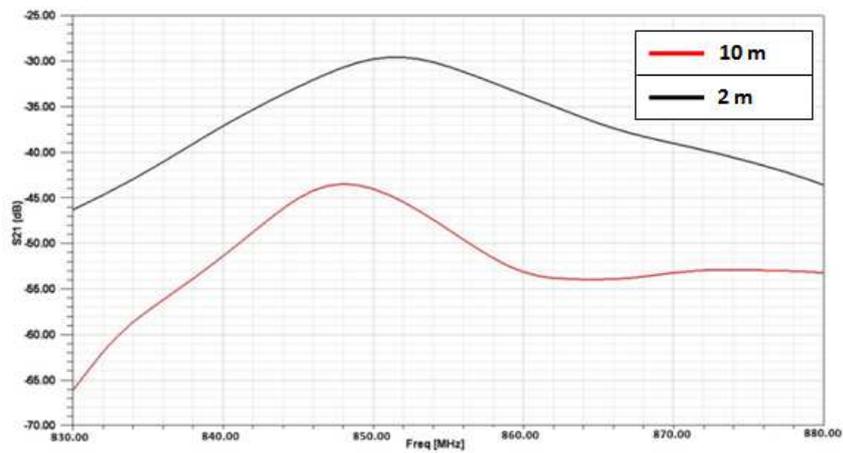


Figure 3.8 : Coefficient de transmission S_{21} de l'antenne du puits se situant sur l'axe de l'antenne du nœud.

La figure 3.9 illustre la communication entre une antenne patch noyée dans une boîte de béton à une distance de 20 cm dans le béton sec (cf. chapitre 2) et une antenne au niveau du puits. La distance entre les deux antennes est égale à 200 m.



Figure 3. 9 : Communication entre une antenne patch noyée dans le béton et une antenne située dans l'air.

II.3. Simulation du réseau d'antennes :

Un modèle de simulation de 6 antennes patch noyées dans une structure de béton armé d'une hauteur de 3.5 m a été conçu. On positionne les antennes patch le long de la structure et on les attache aux armatures (voir figure 3.10). L'antenne cornet est située à l'extrémité de la structure.

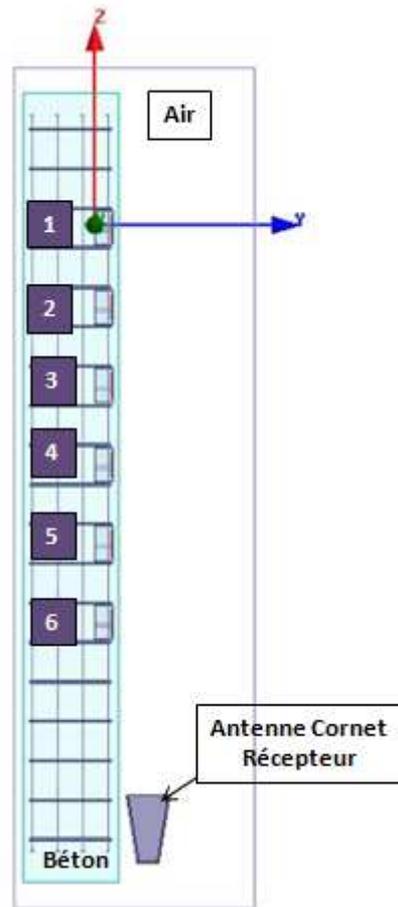


Figure 3.10 : Modèle de simulation de 6 antennes patch noyées dans le béton

On remarque que la position des différentes antennes à un effet négligeable sur les coefficients de réflexion et leurs fréquences de résonance avec ($S_{11} = -8.36$ dB) pour l'antenne 1 et ($S_{11} = -9.02$ dB) pour l'antenne 6 comme illustré figure 3.11. Le tableau 3.3 illustre les coefficients de transmission des 6 antennes qui varient entre ($S_{21} = -22.29$ dB) pour l'antenne la plus proche du cornet et ($S_{21} = -35.65$ dB) pour l'antenne la plus éloignée du cornet.

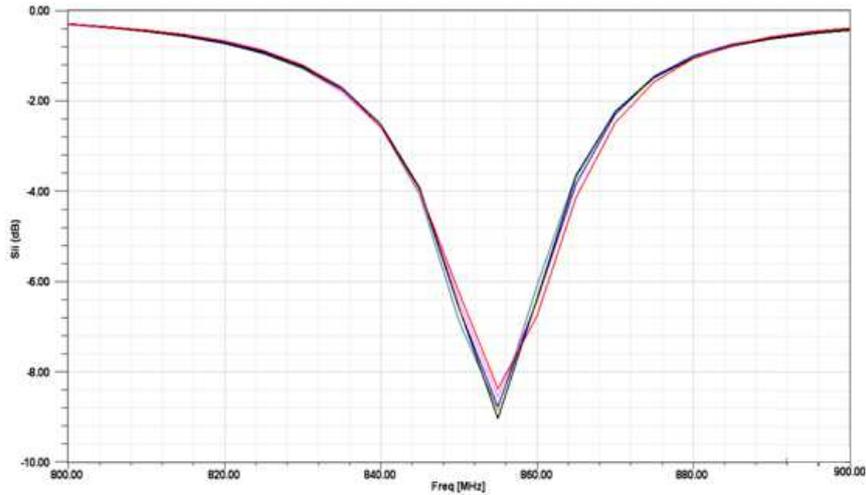


Figure 3.11 : Coefficients de réflexion des 6 antennes patch noyées dans le béton

Antennes	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)
1	-8.36	-35.65
2	-8.4	-34.62
3	-8.54	-32.42
4	-8.76	-30.64
5	-8.76	-29.57
6	-9.02	-22.29

Table 3.3: Coefficients de réflexion et de transmission des 6 antennes patch noyées dans le béton

III. Consommation et durée de vie des nœuds de capteurs:

Les nœuds de capteurs sont alimentés par des batteries et donc possèdent une durée de vie de l'ordre de quelques années car le remplacement des batteries n'est pas possible à l'intérieur des structures en béton armé. Afin de concevoir des solutions efficaces en énergie, il est important de pouvoir optimiser la consommation énergétique des nœuds de capteurs, il est donc nécessaire de pouvoir mesurer avec précision ces consommations.

A l'IRCICA, beaucoup d'études se concentrent sur la consommation de l'énergie des nœuds réels et en fonctionnement dans un réseau grâce à une plateforme « synergie » (Système Versatile de mesure d'énergie dans les réseaux de capteurs ». La figure 3.12 illustre des mesures de courants consommés pour chaque composant d'un nœud réalisées à l'aide de la plateforme Synergie [78].

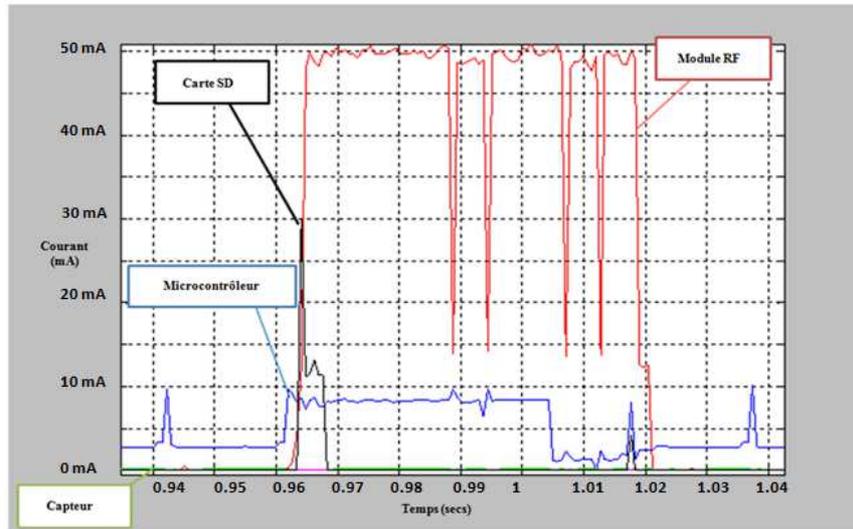


Figure 3.12: Exemple de mesures de courant avec la plateforme Synergie [78].

On peut constater d'après la figure 3.12 que le dispositif de communication est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure le transfert de paquets entre le capteur et la mémoire ainsi que la communication entre les nœuds de capteur et leurs puits. Cependant, la consommation du microcontrôleur peut être conséquente si le volume de données échangées sur le réseau est important. Donc il faut prévoir que la technologie et la programmation au niveau du microcontrôleur soit optimisées pour minimiser sa consommation. Dans certains cas [77], on peut estimer le rapport de la consommation de la radio à environ 2 fois celle d'un microcontrôleur [77]. Il est donc important d'optimiser le module radio, le microcontrôleur mais aussi le protocole de communication pour minimiser la consommation d'énergie globale du nœud et donc augmenter sa durée de vie.

On distingue quatre modes de composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil et chaque mode est caractérisé par une valeur différente pour la consommation d'énergie [76].

- **Mode actif** : la radio est allumée sans être employée. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.
- **Mode sommeil** : la radio est mise hors tension.

- **Mode transmission** : la radio transmet un paquet.
- **Mode réception** : la radio reçoit un paquet.

La consommation de la communication (mode transmission) est fonction de la quantité des données à communiquer, de la distance de transmission, des propriétés physiques du module radio, de la présence ou non d'interférences et de la taille des paquets envoyés. En effet, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. Si elle est faible, le nombre des échanges de paquets de contrôle augmentera (Overhead), si elle est trop élevée, une puissance de transmission élevée sera nécessaire [78]. Une des techniques pour minimiser la consommation d'énergie est d'éteindre le dispositif de communication dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et/ou à recevoir. Cependant, réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur.

Dans un nœud de capteur, l'énergie du capteur (unique) est utilisée pour accomplir les tâches suivantes : l'échantillonnage du signal et la conversion analogique/numérique. En général, l'énergie du capteur représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud (voir figure 3.12). Pour notre étude, l'exigence de courant des jauges de contrainte est de 2 mA pour une résistance de 1000 Ω et une excitation de 3.3 V (Cf. paragraphe IV.2.3.3). Dans ce cas, l'énergie du capteur n'est plus négligeable mais dépend du temps d'activité des jauges de contrainte (fréquence de mesure et fréquence d'envoi des mesures) et de leurs niveaux de courant dans l'état actif et l'état sommeil. De plus, l'intégration d'un seuil d'alerte pour réduire la fréquence d'envoi peut s'avérer intéressante pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau du nœud. Les mesures sont enregistrées dans la mémoire embarquée des nœuds et envoyées seulement si un seuil déjà défini est déclenché. Ce qui permettra des périodes d'inactivité prolongée pour économiser de l'énergie.

A titre d'exemple, il serait intéressant d'étudier l'évolution de la température, de l'humidité et de la déformation pendant la cure du béton à une fréquence élevée et de définir par la suite des seuils d'alarmes tels que 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) pour la température, 50 % (± 5 %) pour l'humidité relative et (100 $\mu\text{m/m}$) comme seuil de déformation en traction conduisant à la fissuration.

On effectue une simulation sur Matlab afin de calculer la durée de vie du nœud de capteur. Pour nos calculs, on considère les composants radio, microcontrôleur et capteur de nœuds déjà caractérisés (voir table 3.4).

Radio	courant
Mode actif (TX)	9mA(@-10dBm)
Mode actif (RX)	12.8mA
Mode sommeil	2.5 μ A
Microcontrôleur	courant
Mode actif	2-6 mA
Mode sommeil	1-10 μ A
Capteur	courant
Mode actif	2 mA
Temps d'activité	15 ms

Table 3.4 : Exigences de courants des composants radio, microcontrôleur et capteur d'un nœud

Pour ces données, on a calculé une durée de vie du nœud égale à 30 ans pour un temps d'acquisition et de transmission de 1 mesure chaque 1 heure et une batterie de 1.2 Ah avec l'hypothèse d'un lien parfait sans interférences. On change le niveau de courant du microcontrôleur en mode actif et mode veille et on varie la taille de la batterie pour déterminer la durée de vie d'un nœud avec des temps d'acquisition égale à 1 mesure chaque 1 heure. On ne peut varier le niveau de puissance d'émission car cela influencera la portée. On obtient une durée de vie de 60 ans pour une batterie de 2.5 Ah et enfin une durée de vie de 120 ans pour une batterie de 5 Ah.

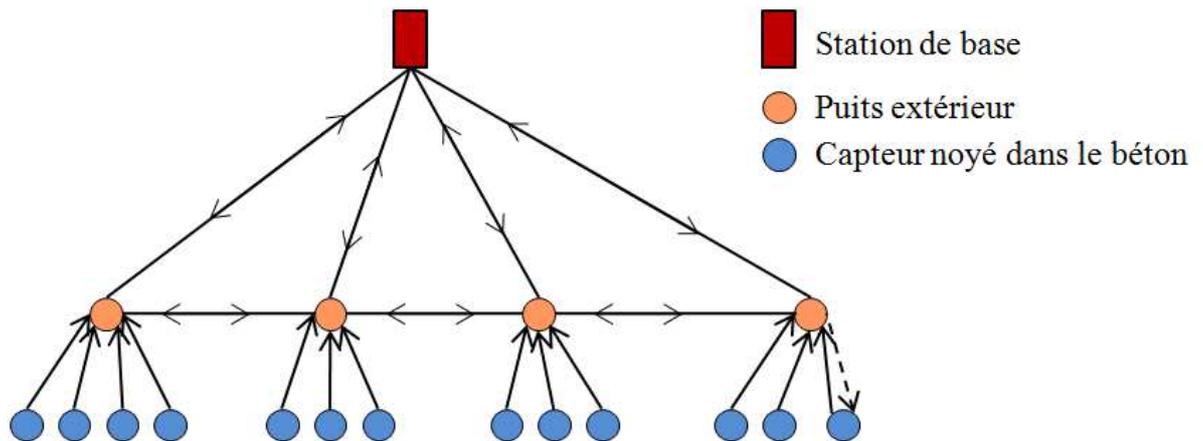


Figure 3.13 : Configuration réseau de capteurs sans fil

Pour notre étude, nous avons choisi une configuration de réseau de capteur sans fil de type arbre, les nœuds de capteurs sont fixés aux armatures et fonctionnent en émetteur au sein du réseau. Toutefois, ces nœuds de capteurs sont programmables ce qui va permettre de paramétrer les fréquences de mesure et d'envoi (début de la réalisation du béton jusqu'au séchage et après le séchage). Un circuit pour la mise en marche des nœuds de capteur est intégré. Il sera mis en marche par télé-alimentation juste avant l'écoulement du béton pour réveiller les nœuds. Le microcontrôleur gère la mise en sommeil du nœud après chaque mesure et l'envoi du paquet de données selon que l'on se trouve dans la période de formation du béton ou après. Les puits locaux sont situés à l'extérieur de la structure et transmettent les données mesurées directement à la station de base et possèdent aussi la possibilité de communiquer entre eux (voir figure 3.13). Ces éléments sont moins contraints au niveau de la consommation d'énergie, mais ils doivent absolument transmettre l'information le plus efficacement possible à la base donc il faut prévoir une étape d'optimisation du routage de l'information au niveau des puits et de la station de base.

Nous avons mis en place une topologie de réseau de capteurs permettant de minimiser la consommation d'énergie au niveau du nœud.

Dans la partie suivante, nous présentons les différents capteurs (capteur de température, d'humidité et de contrainte) utilisés pour étudier l'évolution d'un édifice en fonction du temps et estimer sa durée de vie.

IV. Etudes des différents capteurs pour étudier les déformations d'un édifice en béton :

IV.1. Déformations et contraintes :

IV.1.1. Définitions :

La déformation ou allongement relatif ε , d'un élément unidimensionnel dont la longueur l_0 , est définie comme :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Eq. 3.4}$$

La déformation est donc une grandeur sans dimension mais on l'exprime souvent en % ou en $[\mu\varepsilon]$ qui est équivalent à $[\mu\text{m.m}^{-1}]$.

On peut prédire le comportement d'un objet ou d'un matériau en observant son diagramme contrainte-déformation. Ce diagramme montre où va se situer la contrainte maximale, d'où découlera le déplacement maximal. Cette courbe peut être réalisée grâce au module de Young (voir figure 3.14).

La déformation élastique est une déformation réversible : le milieu retourne à son état initial lorsque l'on supprime les sollicitations [65]. Pour des petites amplitudes, les déformations sont proportionnelles aux contraintes σ , définies à partir de la force F et la surface S comme :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Par la loi de Hooke : $\sigma = E\varepsilon$ Eq. 3.6

E est le module d'élasticité, appelé aussi module d'Young. Pour le béton standard, E va de 20 Pa à 50 GPa. Pour les autres types de béton, il augmente avec la valeur de la résistance à la compression.

La déformation est permanente si le solide déformé ne reprend pas sa forme initiale lorsque la contrainte cesse. On dit que le matériau a un comportement plastique. Avec une augmentation de la contrainte, le matériau atteint un second seuil, son point de rupture et il casse.

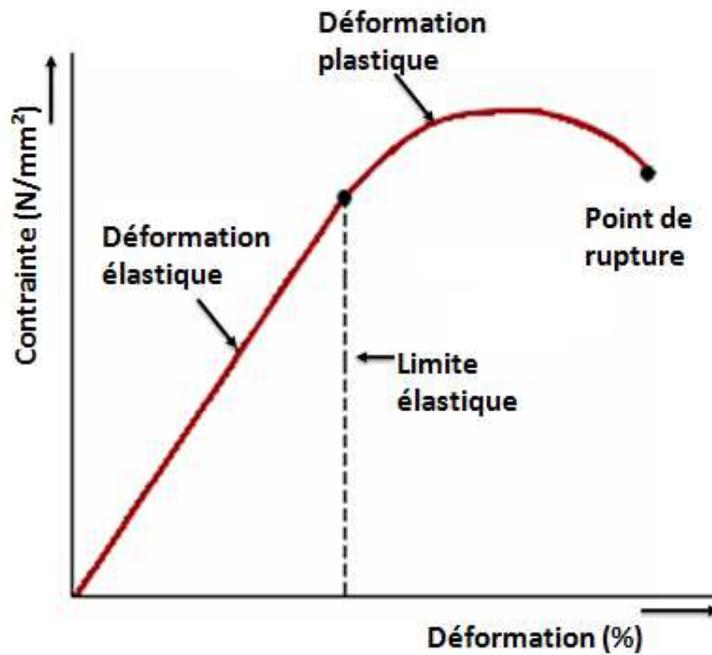


Figure 3.14: diagramme contrainte – déformation

IV.1.2. Tenseur des contraintes, tenseur des déformations :

Le tenseur des contraintes est un tenseur d'ordre 2 à 3 lignes et 3 colonnes. Soit une base $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ et un point M de la pièce. On considère un cube de matière autour du point M d'arête $dx = a$. Les faces i et $-i$ sont les faces normales à \vec{e}_i en partant du centre du cube (voir figure 3.15).

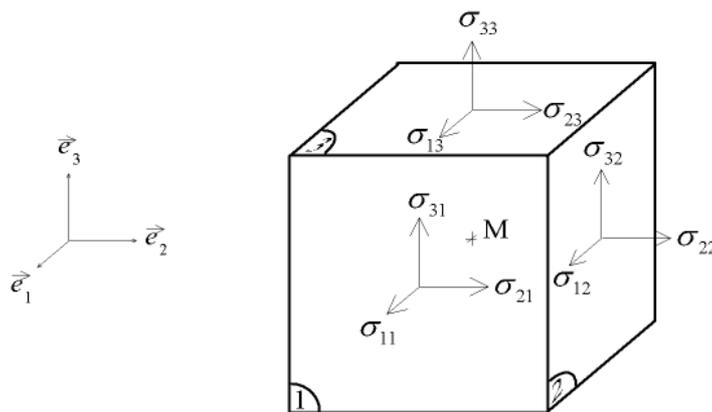


Figure 3.15 : Définition du tenseur des contraintes

Sur la face j s'exerce un vecteur-force \vec{F}_j qui possède 3 composantes : $\vec{F}_j = \begin{pmatrix} F_{1j} \\ F_{2j} \\ F_{3j} \end{pmatrix}$

F_{ij} étant la composante selon \vec{e}_i du vecteur force s'exerçant sur la face j . La surface de chaque facette étant a^2 on définit 9 composantes σ_{ij} homogènes à des contraintes : $\sigma_{ij} = \frac{F_{ij}}{a^2}$ Eq. 3.7

On décrit l'état de contrainte par le tenseur :

$$T(M) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Le tenseur des déformations est défini à partir des déplacements \vec{u} comme suit :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Eq. 3.9}$$

Ce tenseur est symétrique par définition. Les ε_{ii} sont les déformations provenant de la dilatation et de la compression. Cependant, les ε_{ij} sont créés par un cisaillement (Figure 3.16).

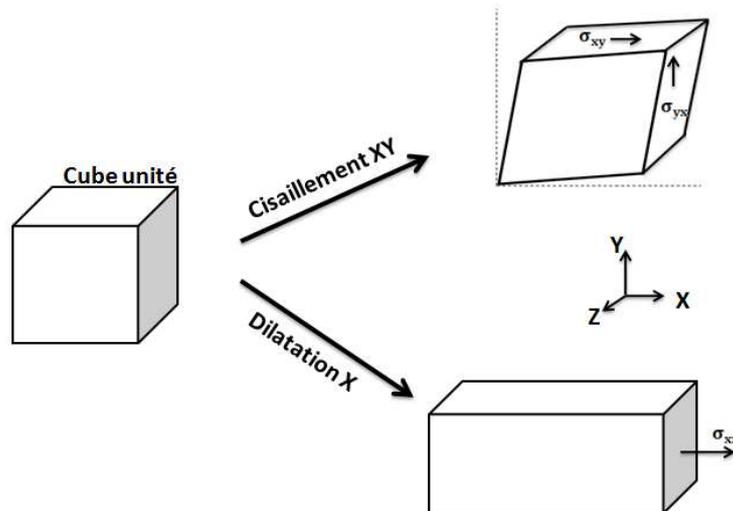


Figure 3.16 : Effet d'une compression et d'un cisaillement sur le cube unité.

IV.2. Etat de l'art des capteurs de déformation :

Les déformations du béton peuvent mettre en cause la durabilité des ouvrages. Afin d'évaluer les dégradations d'une structure, il est possible d'implanter des capteurs dans la structure ou à la surface de celle-ci. Ces capteurs permettront de mesurer les déformations dans la structure dans des zones choisies et de calculer les contraintes qui sont à leur origine. Dans cette partie, on présente les différents capteurs de déformation traditionnels utilisés dans le génie civil.

IV.2.1. Les capteurs à corde vibrante :

Le principe de fonctionnement de ces capteurs est basé sur la fréquence de résonance d'une corde tendue entre deux points enrésés dans la construction à contrôler. Si la distance entre ces deux points varie au cours du temps suite à une déformation de la construction, la tension de la corde change ce qui entraîne une variation mesurable de la fréquence de résonance [67].

L'équation des cordes est définie comme suit:

$$f_c = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Où f_c est la fréquence de résonance, l la longueur de la corde, σ la contrainte exercée sur la corde et ρ la masse volumique.

Un capteur à corde vibrante est composé de trois parties : une corde vibrante, une mécanique pour transmettre la force exercée au capteur sur la corde et une partie électronique capable d'exciter la corde (voir figure 3.17).

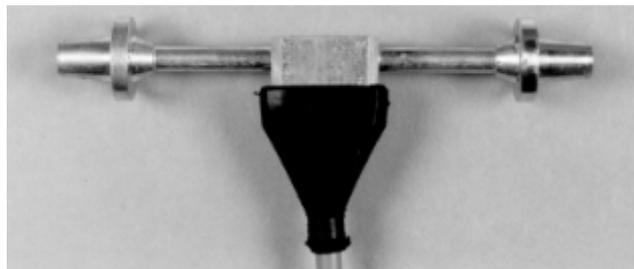


Figure 3.17 : Capteur à corde vibrante destiné à être placé à l'intérieur du béton.

La précision de ce type de capteur est en général garantie à moins de 0.5 % de l'étendue de mesure. Un des principaux désavantages de ce capteur est que sa sensibilité dépend de la température. Dans l'équation 3.10, les paramètres comme la longueur l , le module d'Young et la densité volumique, sont thermiquement variables.

IV.2.2. Les capteurs à fibre optique :

Les fibres optiques sont des guides d'ondes électromagnétiques en silice qui ont la propriété de conduire la lumière. Une fibre standard est constituée de trois composants : un cœur optique de diamètre $10\ \mu\text{m}$, une gaine optique de diamètre $125\ \mu\text{m}$ et une gaine protectrice en matière plastique [66]. La lumière se propage dans le cœur tout le long de la fibre (voir figure 3.18).

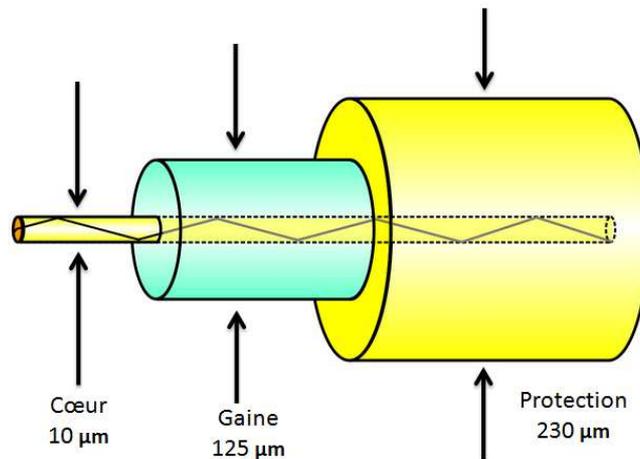


Figure 3.18 : Principaux éléments des fibres optiques

La fabrication des fibres optiques se déroule en deux étapes :

1. La fabrication d'une préforme qui est un barreau cylindrique d'un diamètre de quelques centimètres ayant le même profil de matériaux que la fibre finale.
2. Le fibrage (ou tirage de la fibre), qui constitue la réduction de l'échelle de cette préforme pour obtenir la fibre.

Un capteur à fibre optique (figure 3.19), est un dispositif dans lequel l'information est créée par la réaction de la lumière à la grandeur à mesurer dans le chemin optique [68]. Contrairement à une liaison optique où l'information est simplement transmise de l'émetteur au récepteur, la fibre est à la fois l'élément sensible et le vecteur d'information. Dans un capteur à fibre optique (CFO), un ou plusieurs paramètres du rayonnement lumineux sont modifiés directement ou indirectement par la grandeur à mesurer quelque part dans le chemin optique.



Figure 3.19 : capteur à fibre optique

IV.2.3. Les jauges de contrainte :

IV.2.3.1. Principe:

Une jauge est constituée d'un très fin fil (2 microns) conducteur collé sur un support. La figure 3.20 illustre la forme de la jauge. Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure, on peut admettre que le fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée. Elle est toujours collée sur la structure donc elle subit sa déformation et ses faibles dimensions, du mm au cm selon les modèles, permettent des mesures quasi ponctuelles [69].

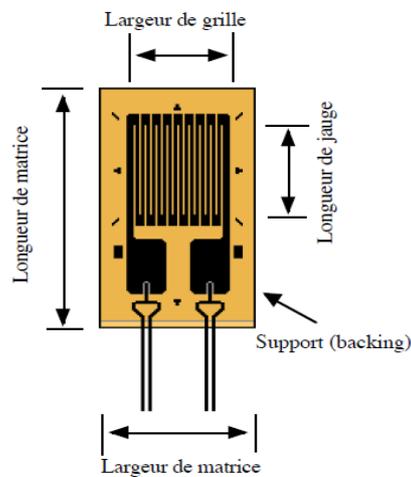


Figure 3.20 : Diagramme d'une jauge

La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :

$$R = \frac{\rho L}{s} \quad \text{Eq.3.11}$$

Et:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta s}{s} \quad \text{Eq.3.12}$$

Donc :
$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Eq.3.13}$$

Où : R est la résistance électrique, ρ la résistivité du matériau, L la longueur du fil, s la section du fil et K est appelé le facteur de jauge qui est une constante dépendante des matériaux considérés et de la température.

Différents critères doivent être pris en compte, parmi lesquels le facteur de jauge, la résistance à la fatigue, l'aptitude au soudage et la tenue en température. Les principaux matériaux pouvant servir dans la réalisation de capteurs à jauges de contraintes se distinguent par leur comportement thermique, leur résistance à la fatigue ainsi que par leurs propriétés de linéarité (voir tableau 3.5).

Alliage	Composition	Facteur de jauge k	Tenue en température
Constantan	45 % Ni , 55 % Cu	2.0 à 2.1	200 °C
Karma	74 % Ni, 20 % C, 3 % Cu, 3% Fe	2.1 à 2.2	350 °C
Platine - Tungstène	92 % Pt, 8 % W	4.0 à 4.6	> 350 °C

Tableau 3.5 : Caractéristiques des alliages des jauges de contrainte.

IV.2.3.2. Montage du pont de Wheatstone :

Le principe de fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est basé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. Le pont de Wheatstone est constitué de 4 résistances identiques R1, R2, R3, R4, disposées en quadrilatère comme indiqué sur la figure 3.21. Entre les points A et C, le pont est alimenté par un générateur à tension constante. Un voltmètre très sensible (galvanomètre) est placé entre les point B et D [70].

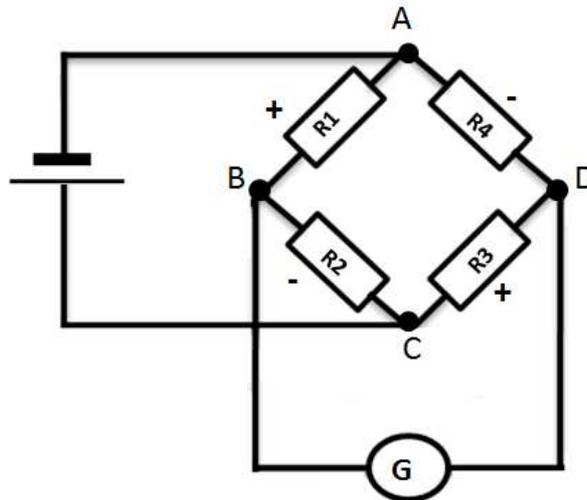


Figure3.21 : Montage en Pont de Wheatstone

La variation de l'une quelconque des résistances fait apparaître entre B et D une tension mesurée par le galvanomètre. Cette tension est directement proportionnelle aux variations relatives de résistance $\frac{\Delta R}{R}$.

Les signes + et - placés sur la figure indiquent que, dans un tel montage, 2 résistances adjacentes agissent en sens inverse, alors que 2 résistances opposées agissent dans le même sens. Un capteur est donc constitué par un tel pont dont soit 1, soit 2, soit 4 des résistances sont des jauges de contraintes.

a) Montage en pont complet :

Le montage est celui de la figure 3.21, chaque résistance étant remplacée par une jauge.

b) Montage en 1/2 pont :

Deux résistances du pont sont remplacées par des jauges. Ce montage est utilisé pour éliminer les déformations de dilatation dues à la température (compensation de température). On mesure la différence des signaux fournis par 2 jauges, car étant montées dans des bras adjacents du pont, elles agissent en sens opposés.

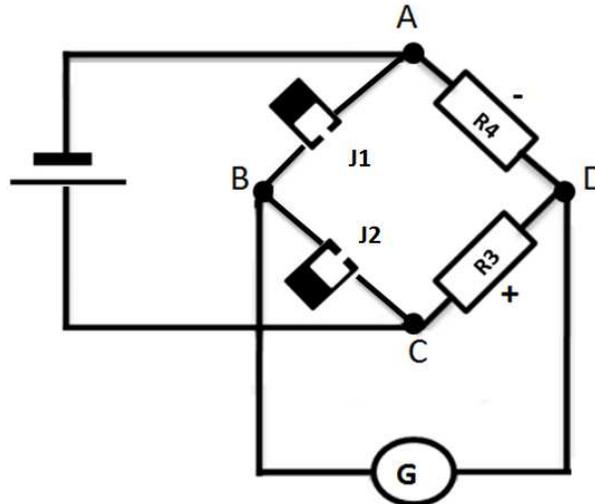


Figure 3.22 : Montage en Demi-pont

c) Montage en $\frac{1}{4}$ de pont :

Cablage à 2 fils : Seulement une résistance est remplacée par une jauge, 2 fils relient la jauge au pont. Ce montage est le plus simple. Il est utilisé lorsque la jauge n'est pas éloignée du pont et qu'on ne craint pas les effets thermiques.

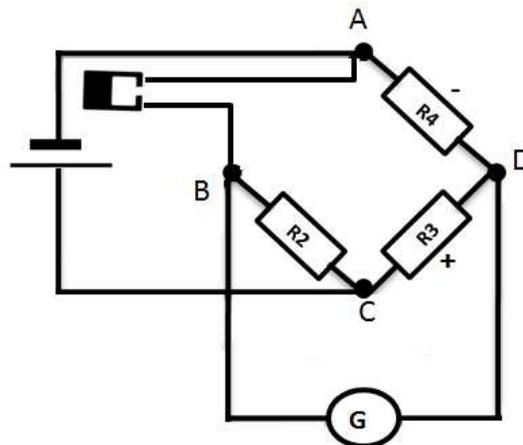


Figure 3.23 : Montage en quart de pont 2 fils

Cablages à 3 fils : On utilise ce montage si la jauge se trouve éloignée du reste du pont et par crainte des effets thermiques sur les fils de liaison. La jauge est reliée au pont par 3 fils. En effet, les fils aA et bB se trouvent chacun dans une branche adjacente du pont, leurs effets agissent ainsi en sens opposés et s'annulent.

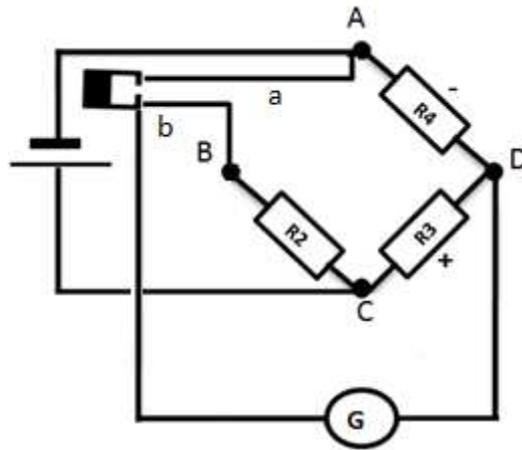


Figure 3.24: Montage en quart de pont 3 fils

IV.2.3.3.. Exigences de courant pour différentes configurations de Jauges de contraintes :

Afin de déterminer les exigences de courant des configurations de jauge de contraintes, on effectue un montage en quart de pont de Wheatstone. On utilise 2 jauges de contraintes avec des résistances de 120Ω et 1000Ω respectivement (voir figure 3.25). Ces valeurs étant les plus courantes en industrie.

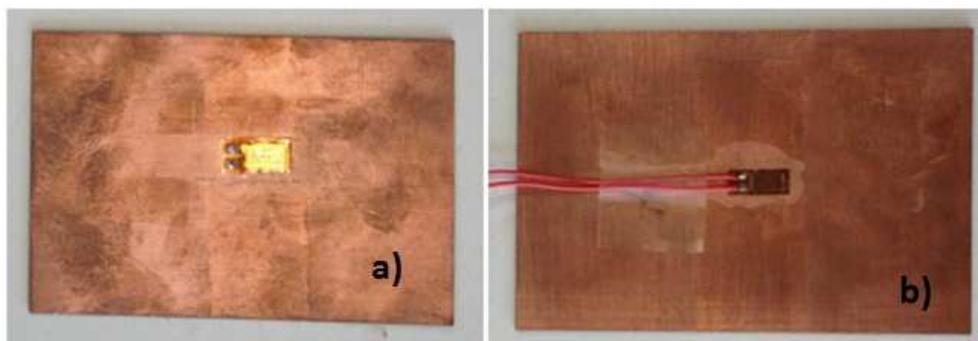


Figure 3.25: Jauges de déformation avec : a) 120Ω b) 1000Ω

Le tableau 3.6 illustre les exigences de courant pour une configuration en quart de pont. Une jauge de 120Ω exigera un courant égal à 31 mA à partir d'une source de 3.33 V par contre une jauge de 1000Ω exigera seulement un courant égal à 2 mA . On constate que la consommation de courant par le circuit en montage en

Le pont dépend de la résistance des jauges de contrainte, de leurs configurations en pont (quart, demi, ou pont complet) et du niveau de tension.

Configuration de pont	Excitation	
	3.333V	10V
120 Ω quart ou demi-pont	31mA	95mA
1000 Ω quart ou demi-pont	2mA	10mA

Tableau 3.6: Exigences de courant pour différentes configurations de Jauges de contrainte

IV.2.4. Récapitulatif des performances des capteurs de déformation:

Le tableau 3.7 présente les différents avantages et inconvénients des capteurs de déformation présentés précédemment.

Capteurs de déformation	Avantages	Inconvénients
Capteur fibre optique	<ul style="list-style-type: none"> - Faiblement intrusif - Faible sensibilité de température - Faible interférences électromagnétiques - Opérabilité à des températures extrêmes - Erreur de 0.8% - Incertitude de 0.01%. - Etendue de mesure - 5 000 	<ul style="list-style-type: none"> - Connectique délicate - Faible diamètre des fibres - Prix élevé - Manque de retour d'expériences

	$\mu\text{m/m}$ à + 5 000 $\mu\text{m/m}$	
Jauge de contrainte	<ul style="list-style-type: none"> - Faible poids et taille - Fiabilité des mesures - Simplicité de mise en œuvre - Coût faible - Faible sensibilité de température - Erreur de 0.5% - Incertitude de 0,01 %. - Etendue de mesure $\pm 10 \mu\text{m/m}$ à $\pm 200\,000 \mu\text{m/m}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigences de courant très élevées
Corde vibrante	<ul style="list-style-type: none"> - Insensible aux grandes longueurs de câble - Transmission à longue distance. - Insensibilité aux surtensions - Erreur de 0.5% - Incertitude de 0.02% - Etendue de mesure à 4000 $\mu\text{m/m}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à la température - Fortement intrusif - Mesures ponctuelles

Tableau 3.7 : Avantages et limitations des capteurs de déformation.

Les capteurs à corde vibrante se caractérisent par leur fiabilité de transmission de données à longue distance cependant ils sont sensibles à la température et leurs dimensions font qu'ils sont fortement intrusifs. De ce fait nous n'avons pas choisi ce type de capteurs pour notre étude.

Les capteurs à fibre optique possèdent une faible sensibilité de température ce qui permet de ne pas influencer l'environnement. Leurs faibles poids et taille les rends faiblement intrusif. Par contre la connectique des fibres optique reste délicate et cette technologie manque aussi de retour d'expériences.

Pour notre étude de réseau de capteurs noyés dans le béton, nous avons choisi de travailler avec des jauges de contrainte compte tenu de la facilité et la rapidité d'installation sur l'ouvrage ainsi que leurs faibles tailles pour limiter les effets d'inclusion.

V. Capteurs de température et d'humidité du béton :

Dans cette étude nous présentons des mesures de température et d'humidité internes du béton en utilisant un capteur sans fil noyé dans une boîte de béton.

V.1. Température et humidité internes du béton

Les mesures d'humidité internes du béton peuvent être difficiles étant donné que l'intérieur n'est pas facilement accessible pour les capteurs. L'humidité du béton subit des changements rapides sur la surface. Cependant, une variation de l'humidité interne peut prendre des jours en fonction de l'épaisseur de la structure. Les méthodes basées sur la mesure en surface ne mesurent que l'humidité et la température présentes sur une profondeur de 20 mm et ne reflètent pas la réalité.

La température et l'humidité internes constituent des indicateurs clés pour l'évaluation du béton et la détérioration de la structure. Les propriétés du béton changent avec le temps, et ces propriétés (résistance du béton, module d'élasticité, etc.) sont fortement influencées par la température et l'humidité contenues dans le béton de jeune âge [63].

Une augmentation de la température du béton peut provoquer son durcissement précipité et causer des pertes de maniabilité. Aussi, une perte d'humidité du béton peut contribuer à sa perte rapide d'eau et entraîner l'apparition des fissures en quelques heures après le décoffrage.

Donc, maintenir la température et l'humidité internes du béton à des taux adéquats pendant sa cure (3 à 7 jours) permet au béton de développer les propriétés requises telles que la durabilité, l'étanchéité, la résistance à la compression, la stabilité volumétrique et la résistance au gel/dégel selon sa classe.

L'utilisation des capteurs sans fil noyés dans le béton pour des mesures de température et d'humidité représente un grand avantage (cf. chapitre 1) par rapport aux autres méthodes de surveillance traditionnelles.

V.2. Conception de la boîte d'encapsulation :

Les capteurs sans fil doivent être noyés dans le béton pour mesurer la température et l'humidité relative à l'intérieur des structures en béton armé. Cependant, le béton est fortement alcalin, et sa teneur en eau ainsi que l'impact de son coulage peuvent endommager les capteurs. Une boîte d'encapsulation est utilisée afin

d'assurer la protection de ces composants électroniques et permettre des mesures directes et en temps réels de la température et de l'humidité internes du béton.



Figure 3.26 : Boîtier du capteur de température et d'humidité

La taille du boîtier dépend principalement de la taille des composants électroniques du capteur. Un côté du boîtier a été troué et rempli par du mortier de ciment (voir figure 3.26). Le mortier de ciment a été choisi parce qu'il peut donner une image fidèle de la température et l'humidité du béton, tout en empêchant la grande quantité d'eau et de béton de s'infiltrer dans l'espace de mesure de la boîte. Le dosage du mélange du mortier de ciment pour ces boîtes est le suivant : Ciment: Sable: eau = 1: 3: 0,5 = 100 g : 300 g : 50 g.

Dans un premier temps, le boîtier a été placé au-dessus d'un récipient qui contient de l'eau chaude. Après chauffage de l'eau pendant 10 minutes, on a observé l'étendue de la vapeur d'eau pénétrant dans le boîtier et on a mesuré la température et l'humidité relative de la vapeur d'eau (voir figure 3.27). Pour cette étude, nous avons choisi une sonde de température et d'humidité de haute précision STH55. La gamme de mesure de température est de -25°C à $+80^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$. La gamme de mesure de l'humidité relative est de 0 à 100%.

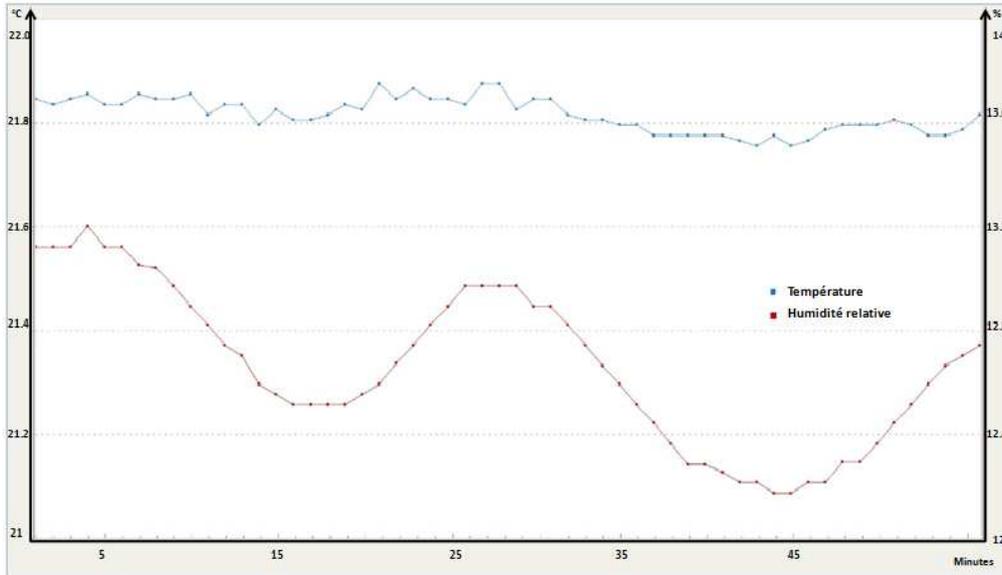


Figure 3.27: Mesures de température et d'humidité relative de la vapeur d'eau pendant 1 heure

La figure 3.27 illustre les résultats des mesures de température et d'humidité relative de la vapeur d'eau portée à ébullition effectuées pendant une heure. On varie la position du boîtier au-dessus du récipient et on remarque la variation de la température et de l'humidité relative en fonction de l'étendue de la vapeur d'eau pénétrait dans le boîtier ce qui montre la porosité du mortier de ciment.

Ensuite, la sonde de température et d'humidité a été placée au centre d'une caisse de dimension $(60 \times 40 \times 20)\text{cm}^3$. Enfin, une antenne patch a été placée dans le moule et positionnée à 5 cm du bord. Le récepteur est situé à 1 m du moule. Du béton standard a été coulé (voir figure 3.28).



Figure 3.28: Capteur de température et d'humidité noyé dans la caisse de béton.

V.3. Mesure de la température et de l'humidité du béton :

Les figures 3.29 et 3.30 présentent les résultats des mesures de température et d'humidité effectuées pendant 5 jours. Au cours des 12 premières heures, on remarque sur la figure 3.29 l'augmentation de la température de $12,9\text{ °C}$ à $20,9\text{ °C}$

durant la période où le ciment et l'eau réagissent. La température a atteint un maximum de 23.19 °C au bout de 24h, après quoi la température commence à chuter.

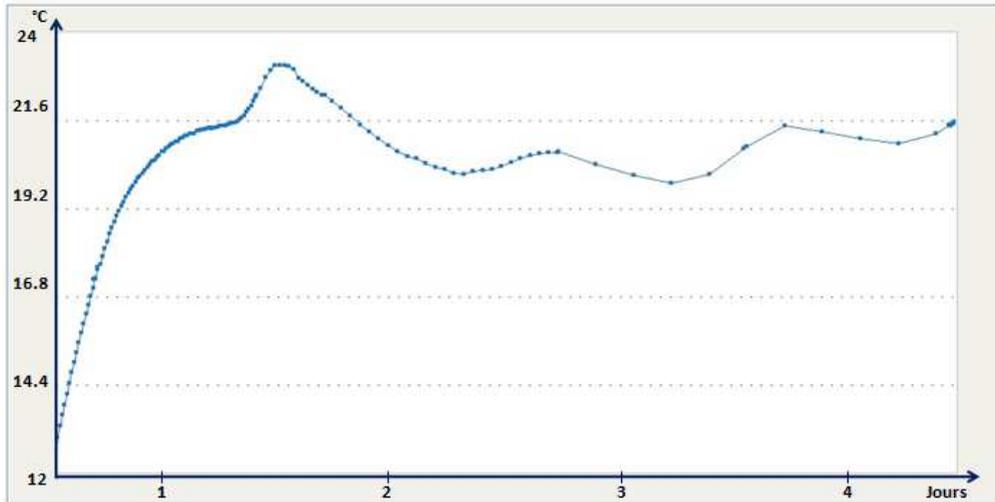


Figure 3.29 : Mesures de températures internes du béton effectuées pendant 5 jours.

Les mesures d'humidité relative au bout des 5 premières heures après l'écoulement du béton ont montré que le capteur a atteint une valeur de 91.74 % (Voir figure 3.30). Ensuite, l'humidité relative a baissé à 85.6% pendant le premier jour. Cette perte est principalement attribuée à l'auto-dessiccation du béton qui représente l'évaporation de l'eau avant et pendant le durcissement [64]. Une évaporation trop rapide de l'eau de gâchage d'un béton frais génère des retraites qui peuvent provoquer la fissuration du béton.

On peut constater aussi que l'humidité relative a atteint une valeur de 97% au 5^{ème} jour. Toutefois, après 5 jours de séchage, l'humidité relative a continué d'augmenter et a atteint 100% en 10 jours. De même, les études de (Norris et Saafi) concluent également que l'humidité relative du béton atteint 100% lors de sa phase initiale et que cette valeur ne diminue de 100% à 75% qu'après 6 mois de séchage [62].

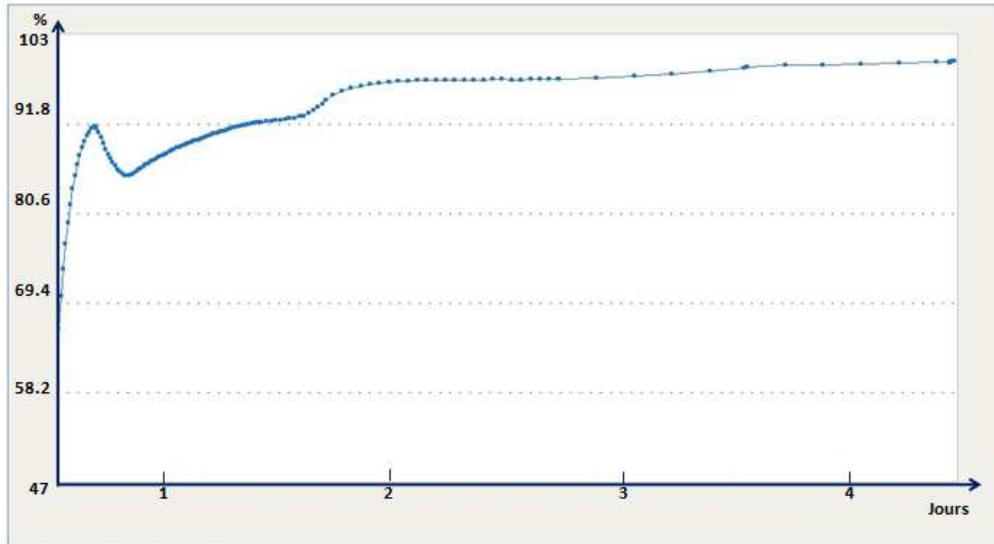


Figure 3.30: Mesures d'humidité internes du béton effectuées pendant 5 jours.

Le capteur est capable de transmettre les mesures de températures et d'humidité internes du béton au module de réception externe par transmission sans fil efficace. Ce qui confirme que le concept de noyer des réseaux de capteurs sans fil dans les structures de génie civil afin de mesurer leurs propriétés est possible.

VI. Réalisation expérimentale d'un réseau de capteurs noyés dans un édifice « Totem » en béton armé :

VI.1. Introduction :

Un essai sur un totem en béton armé, identique à un ouvrage réel, a été réalisé dans le but d'assurer que l'instrumentation utilisant des capteurs sans fil permettait d'obtenir des mesures de température, d'humidité et de déformation comparables à celles effectuées avec des technologies classiques utilisées actuellement. Pour cela, des capteurs d'humidité et des jauges de contrainte et de température intégrées ont été insérés dans le totem. Une photographie de la structure est montrée figure 3.31. Les capteurs insérés dans le totem sont constitués de 4 jauges de contrainte et de 2 sondes d'humidité et température positionnées le long de la structure.



Figure 3.31 : Structure en béton armé « TOTEM »

Dans la partie suivante, nous avons étudié l'influence de la taille des boîtiers des capteurs sur la structure en béton armé « TOTEM ».

VI.2. Etude de l'influence de la taille des capteurs sur une structure en béton :

VI.2.1. Contrainte équivalente de Von Mises :

Soit un état de contrainte principale identique à celui de la figure 3.32 [71]:

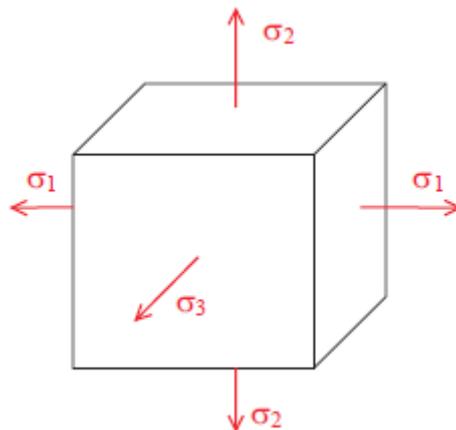


Figure 3.32: Etat de contrainte principale

Le critère de Von mises prend compte des composantes en traction, compression et cisaillement pour donner un niveau de contrainte isotrope. On parle aussi de

contrainte de Von mises ou contrainte équivalente qui n'est pas une contrainte réelle existante à un instant donné à l'intérieur d'un solide, mais utilisée en mécanique pour prédire la rupture. Néanmoins, elle est utilisée pour déterminer si un champ de contraintes donné dans une pièce est acceptable ou non.

Puisque le tenseur des contraintes est une matrice symétrique, il existe au moins une base orthonormée de l'espace dans laquelle le tenseur des contraintes est une matrice diagonale. La contrainte équivalente de Von Mises s'exprime comme suit :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{6} [(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)^2 + (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)^2 + (2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)^2]} \quad \text{Eq. 3.14}$$

Les valeurs σ_1 , σ_2 et σ_3 : appelées contraintes principales.

VI.2.2. Modèle de simulation :

On commence par modéliser une structure en béton de longueur L égale à 3 m et de section (0.5x0.5) m² sur COMSOL Multiphysics (voir figure 3.33). La structure est soumise à une charge surfacique d'exploitation (vent, neige,...) égale à 400N /m² appliquée sur la face XZ qui correspond aux charges dues à la force du vent. La structure est parfaitement encastree en son extrémité. Elle est aussi sollicitée par son poids propre.

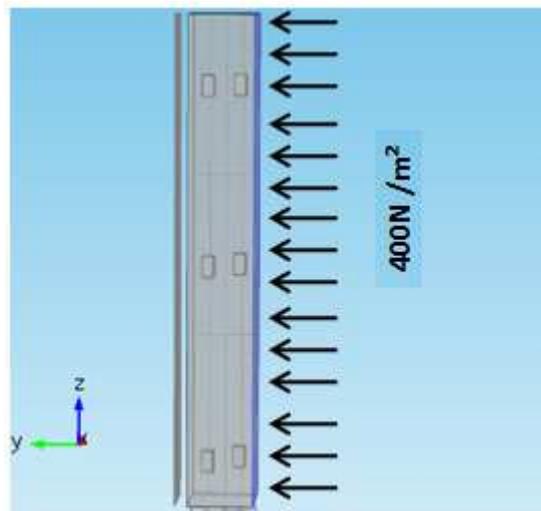


Figure 3.33: schéma d'une structure en béton

On commence par réaliser un maillage tridimensionnel. La géométrie de la pièce incite à utiliser des éléments hexaédriques (plutôt que tétraédriques) afin de

faciliter la construction d'un maillage bien régulier comme illustré sur la figure 3.34.

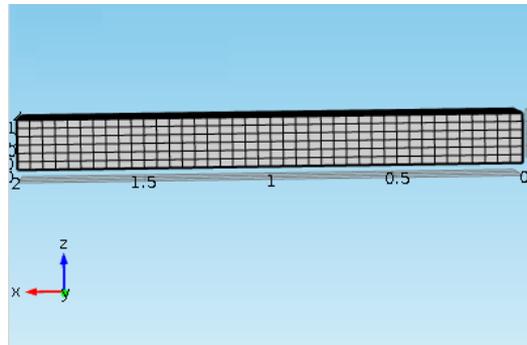


Figure 3.34 : Modélisation 3D de la structure

On intègre des boîtes d'air à l'intérieur de la structure qui vont remplacer les capteurs sans fil noyés dans le béton. On positionne des boîtes d'air de $(8 \times 8 \times 5)$ cm^3 qui sont les dimensions des capteurs avec des antennes patch (voir figure 3.33).

VI.2.3. Etude de l'influence de la taille des capteurs :

La figure 3.35 illustre les valeurs contraintes de Von mises avec une structure en béton (a) sans boîtes d'air et (b) avec des boîtes d'air de dimensions $(8 \times 8 \times 5)$ cm^3 .

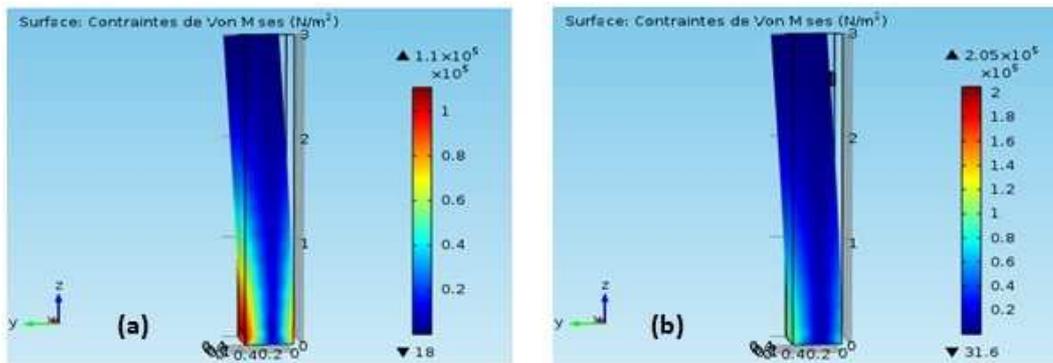


Figure 3.35: Contrainte de Von mises avec : (a) structure sans boîtes d'air et (b) structure avec des boîtes d'air de dimensions $(8 \times 8 \times 5)$ cm^3

On constate tout d'abord que dans la zone située loin des extrémités, les deux solutions concordent parfaitement. Les différences entre les valeurs maximales se situent soit à l'extrémité (au voisinage de l'encastrement) et proviennent de ce

que l'on nomme les effets de bord, c'est-à-dire les variations locales des contraintes et déformations au voisinage des conditions aux limites. Ce qui nous permet de constater les zones soumises au risque de plastification.

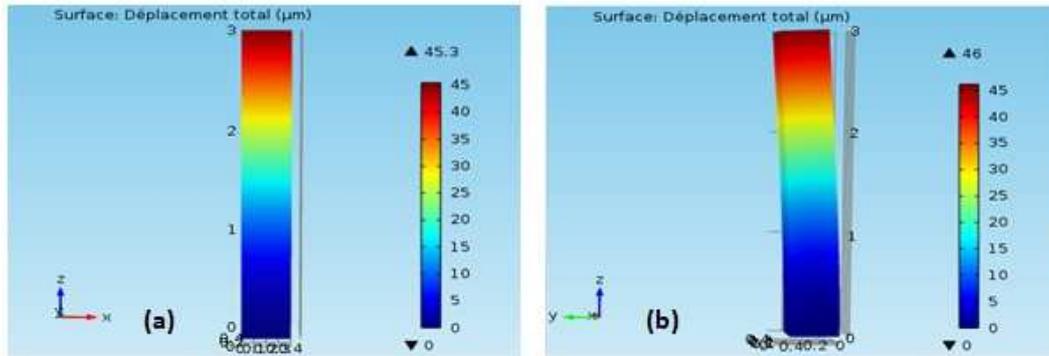


Figure 3.36 : Déplacement total (m) avec : (a) structure sans boîtes d'air et (b) structure avec des boîtes d'air de dimensions $(8 \times 8 \times 5) \text{ cm}^3$

La figure 3.36 illustre le déplacement total d'une structure en béton (a) sans boîtes d'air et (b) avec des boîtes d'air de dimensions $(8 \times 8 \times 5) \text{ cm}^3$. Le déplacement total varie pour une structure en béton sans boîtes avec $45.3 \mu\text{m}$ et une structure contenant des boîtes d'air avec $46 \mu\text{m}$. On peut constater que l'influence des boîtes d'air sur le déplacement total est négligeable pour un chargement surfacique (vents, neige,...) égale à 400 N/m^2 .

VI.3. Dimensionnement de la structure en béton armé « TOTEM » :

VI.3.1. Introduction :

Avant d'entamer les différents travaux de réalisation, nous avons procédé au dimensionnement de la structure en béton armé et de sa fondation. La figure 3.37 illustre le moule du Totem utilisé pour cette étude. Les dimensions du moule sont $(1 \times 1 \times 4) \text{ m}^3$.



Figure 3.37 : Moule de la structure en béton armé (1 x 1 x 4) m³

VI.3.2. Modes de fondations des ouvrages de génie civil :

Les fondations constituent l'un des principaux éléments d'une structure. Elles permettent à la construction de reposer sur le sol tout en la supportant et en assurant sa stabilité.

L'établissement de toute fondation a pour objectif :

- Reporter les charges et les surcharges à un niveau convenable, et les répartir sur une couche de terrain plus ou moins étendue et de résistance adéquate, terrain appelé bon sol, et cela tout en assurant la stabilité et la sécurité de la construction.
- De plus, la fondation devra résister elle même aux charges qu'elle transmet, à la réaction du sol d'assise, à celle des couches de terrains suivant la nature du bon sol rencontré.

Pour cette étude, nous avons utilisé une fondation superficielle dont la profondeur admise varie entre 0.6 m et 1 m pour que le terrain sur lequel elle repose soit à l'abri de la gelée.

VI.3.3. Caractéristiques et influence des terrains sur le choix des fondations :

Avant tous travaux d'installation, le terrain doit être étudié, aménagé et préparé. Le cahier des spécifications et conditions techniques doit indiquer, dans la mesure du possible, tous les renseignements nécessaires à la connaissance du terrain et notamment les suivants :

- Emplacement des travaux ainsi que les accès et abords du chantier,
- Nature et caractéristiques mécaniques des sols et hydrologie,
- Définition et consistance des opérations de nivellement,
- Emplacement et nature des canalisations diverses (eau, égouts, gaz, lignes électriques, télécommunications...) existant sur le terrain et à la périphérie, avec indication de celles qui doivent être préalablement déplacées ou pour lesquelles des précautions spéciales doivent être prises.

Une information géotechnique globale est fournie par le rapport d'investigation de la société FONDASOL en juillet 2003. Ce dernier met en évidence le contexte géologique suivant :

- Terre végétale ou limons remaniés sur une épaisseur de 30cm
- Limons silteux à argileux jusqu'à une profondeur variant de 4.30 m à 6.80 m.
- Une craie limoneuse puis marneuse jusqu'à la base des sondages.

Lors des investigations en juin 2003 des arrivées d'eau ont été repérées à des profondeurs entre 8 et 9 m (période de faible pluviosité). Le tableau 3.8 illustre les caractéristiques de quelques sols.

SOLS	ϕ (degrés)	γ (daN/m ³)	C (daN/m ³)	n (daN/cm ²)
Trouble	0	1000	0	0.2 à 1
Vase, argile saturée	5	1400 à 1700	80 à 100	0.2 à 1
Vase sableuse	10	1400	160	0.2 à 1
Limon, argile humide peu élastique	20	1700	450	1 à 2
Argile surconsolidé, sable fin, marnes	30	1800 à 2100	800 à 950	1 à 2
Sable et graviers compacts, roche altérée	40	1800 à 2200	1300 à 1600	1 à 6

Tableau 3.8 : Caractéristiques de quelques sols [72]

Avec :

- φ : angle de frottement interne du sol
- γ : densité des terres
- c : coefficient de poussée des terres
- n : pression maximale admissible

VI.3.4. Méthode de réseau d'état complétée par la méthode de M. Hahn:

VI.3.4.1. Généralités :

D'une manière générale, l'étude de tout massif non normalisé fait l'objet d'une note de calculs justificatifs suivant la méthode du "**Réseau d'Etat**" complétée par la méthode de **M. Hahn**, relative aux contraintes maximales exercées sur le fond de fouille lorsque le centre de pression est excentré par rapport aux axes principaux. La méthode du réseau d'état consiste à équilibrer les efforts appliqués par les réactions exercées [72,73]. Elle peut s'appliquer sur différents types de sol (voir figure 3.38).

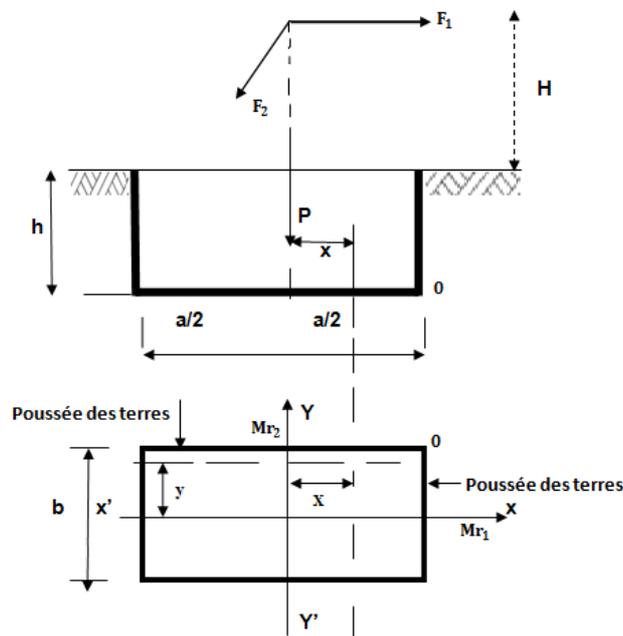


Figure 3.38: Schéma du massif

L'ensemble des calculs seront fait aux ELU (Etat limite ultime) et aux ELS (Etat limite de stabilité). Ce sont les domaines de calcul utilisés pour vérifier la stabilité de l'ensemble :

ELS : Il s'agit du mode sollicitation de « tous les jours », l'ouvrage ne doit pas subir de déformation irréversible. Les matériaux sont employés dans leur domaine de comportement élastique. Tout naturellement, c'est le modèle élastique linéaire qui est utilisé pour les calculs à l'ELS.

ELU : Dans ce mode de sollicitation, l'ouvrage est à la limite de la rupture, il doit résister aux charges mais il subit des déformations irréversibles et en ressort endommagé. Pour cet état, il est inutile de rester dans le domaine de comportement élastique des matériaux, on utilise alors des modèles de plasticité non linéaires qui se rapprochent du comportement réel des matériaux. Les charges permanentes (poids de la structure) sont multipliés par le coefficient 1.35 et les charges d'exploitation par le coefficient 1.5.

Les charges permanentes ou statiques comprennent le poids du totem lui-même, ainsi que le poids du moule. Les charges statiques agissent en permanence vers le bas et s'additionnent en partant du haut du totem vers le bas. Les charges dynamiques peuvent être la pression du vent ou le poids de la neige et les forces sismiques.

VI.3.4.2. Calcul du massif pour la structure « TOTEM » :

Le calcul d'un massif à l'aide de la méthode de M. Hahn nécessite la vérification des conditions suivantes :

- Des conditions de stabilité ;
- Une condition de pression maximale en fond de fouille (cf. annexe 3).

Pour la structure « Totem », le calcul du massif est réalisé avec le logiciel Robot et les vérifications sont menées selon le fascicule 6.2 (Cf. annexe 4). Le tableau 3.9 illustre les dimensions du massif de la structure en béton armé.

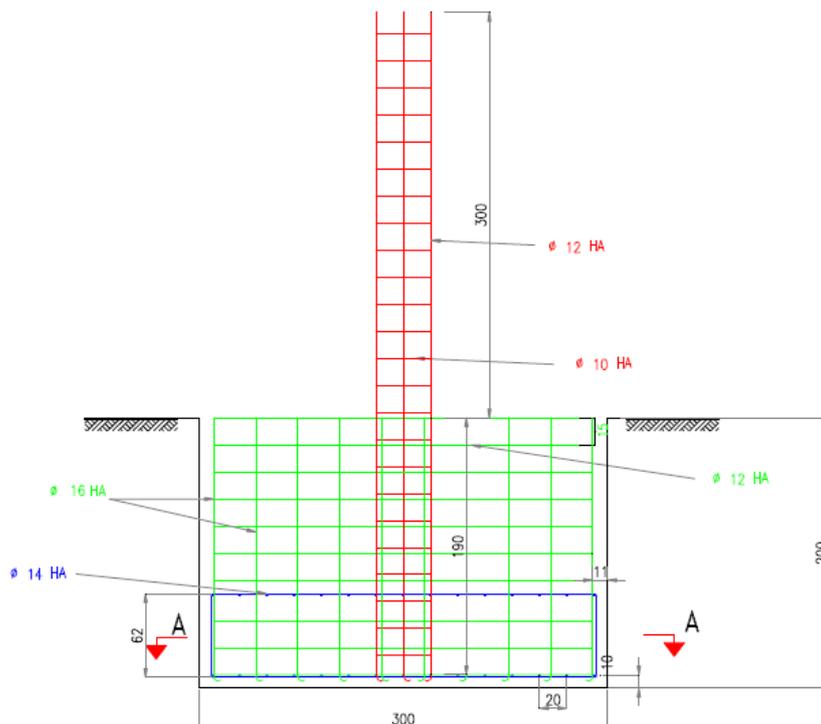
Dimension du Massif	
Largeur du massif en surface	3 m
Largeur du massif au fond	3 m

Epaisseur de la semelle	2 m
Hauteur totale du massif	2m

Tableau 3.9 : Dimensions du Massif

On peut ainsi déduire le ferrailage de la fondation (voir figure 3.39):

- **Enrobage** : espacement de 10 cm
- **Semelle** :
 - Selon la largeur et la longueur du massif: on utilise 14 HA de diamètre 14 mm et espacement de 20 cm
- **Cheminées** :
 - Pour chaque face on utilise 9 HA de diamètre 16 mm et on obtient pour 4 faces $9*4 = 36$ HA Ø16 avec des cadre HA Ø12 et un espacement de 15cm.
 - Pour le ferrailage de la partie supérieur du socle on utilise 9 HA Ø12 avec un enfoncement dans toute la fondation.
 - On utilise des cadres HA Ø10 pour les armatures transversales du Totem.



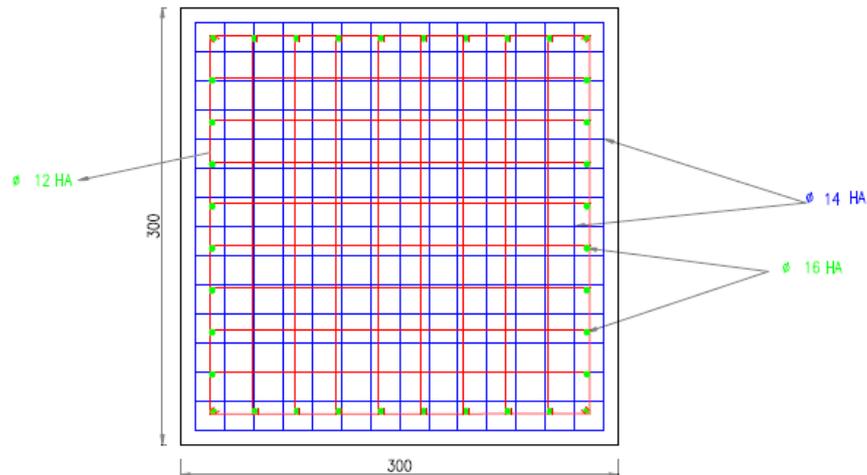


Figure 3.39: Ferrailage du massif de la structure « TOTEM »

VI.4. Evaluation des mesures :

La réalisation du Totem est programmée pour septembre 2016.

VII. Conclusions :

Dans ce chapitre, nous avons traité dans un premier temps les topologies de réseau de capteurs sans fil. Le calcul des portées de capteurs sans fil dans le béton et dans l'air nous a aidés à déterminer la topologie de réseaux de capteurs adéquats pour la surveillance de santé structurale. Cette topologie permet d'envoyer les mesures directement au puits avant de transmettre les informations à la station de base. Les capteurs sans fil seront noyés dans le béton et offriront la possibilité de détecter les déformations internes de la structure dans les zones qui sont difficiles ou impossibles à inspecter autrement tout le long de la vie de l'ouvrage.

Dans un second temps, nous avons présenté quelques concepts importants de mécanique des matériaux, complétés par une présentation des capteurs de déformation traditionnellement utilisés dans ce domaine pour le suivi des ouvrages. La déformation, globale et locale d'une structure, ainsi que la fissuration du béton sont des indicateurs de la durabilité de l'ouvrage. Par la suite, un capteur de température et d'humidité sans fil est noyé dans le béton afin d'étudier l'évolution de la température et de l'humidité internes du béton en fonction du temps pendant une semaine. Enfin, un démonstrateur de réseau de capteurs sans fil noyés dans une structure en béton armé « Totem » d'une hauteur de 3 m est présenté pour valider notre étude.

Conclusion générale et perspectives

Depuis des années, les réseaux de capteurs sans fil sont considérés comme l'une des dix technologies clés d'avenir grâce à l'incroyable potentiel applicatif qu'ils possèdent. Cette technologie a suscité un intérêt croissant pour l'application de surveillance de santé structurale.

Dans la première partie de la thèse, nous avons présenté une étude générale sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs applications dans le domaine du génie civil. Cette étude nous a permis d'illustrer les différents verrous technologiques des réseaux de capteurs en termes d'énergie, d'organisation, de communication dans le béton, d'intégration dans la structure, d'exploitation des données récoltées, etc.

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons identifié les paramètres influant sur les propriétés diélectriques du béton et les différentes techniques de caractérisation du béton ce qui nous a amené à choisir la fréquence 860 MHz et l'antenne Patch pour notre étude. L'influence de l'humidité du béton sur les coefficients de transmission et de réflexion a été étudiée pour deux antennes Patch noyées dans une boîte de béton.

La réalisation d'une communication entre ces deux antennes dans une boîte de béton standard avec un rapport eau/ciment (E/C) égale à 0.5 nous a permis de mettre en œuvre une méthode de mesure de la permittivité relative et de la tangente de pertes du béton, ϵ_r et $\tan\delta$ par rétro-simulation. De plus, l'influence

des configurations des armatures (dimensions et positions vis-à-vis des antennes) sur la communication radio a été étudiée.

Dans la troisième partie, nous avons étudié les portées des capteurs sans fil dans l'air, les bétons sec et humide. Ces mesures nous ont permis de développer une topologie de réseaux de capteurs sans fil spécifique pour être noyée dans le béton armé et pour qu'elle puisse être compatible avec les contraintes de consommation d'énergie d'un nœud de capteur pour la surveillance d'un grand édifice. Les capteurs sans fil sont fixés aux armatures et envoient les mesures directement aux puits. Ces derniers se situent à l'extérieur de la structure et communiquent entre eux avant de transmettre les données à la station de base.

Nous avons développé un prototype de capteur d'humidité noyé dans le béton en utilisant un capteur d'humidité classique. Ce capteur d'humidité est intégré dans un boîtier en mortier de ciment puis noyé dans le béton. Pour notre étude, nous l'avons associé à un capteur de température afin d'étudier l'évolution de la température et de l'humidité internes du béton en fonction du temps. Le boîtier en mortier de ciment est conçu afin d'assurer la protection des composants électroniques du capteur et de permettre des mesures directes et en temps réels sans contact avec le béton. L'influence de la taille des boîtes des capteurs sur le comportement mécanique des structures en béton est étudiée. Ces résultats nous ont permis de prévoir les zones où il y a un risque de rupture de la structure. Enfin, pour valider nos études théoriques, un démonstrateur constitué d'un Totem en béton armé de 3 m dans lequel sont noyés 6 nœuds de capteurs communicants sans fil pouvant mesurer la température, l'humidité et les déformations de cette structure sous l'effet du vent sera réalisé.

Les perspectives ouvertes par ces travaux sont nombreuses et variées. Dans la continuité de nos travaux, nous envisageons d'exploiter des systèmes de récupération de l'énergie mécanique (vibration et déformation) pour alimenter les batteries des nœuds de capteurs. En effet, cette source est adaptée à notre application dans un environnement riche en vibrations mécaniques.

Nous envisageons aussi, d'étudier la durée de vie d'un nœud de capteur (au sein du totem) pour dimensionner au mieux la batterie par rapport au volume disponible.

Une des perspectives de recherche à plus long terme est l'utilisation des drones pour la collecte des données mesurées par des réseaux de capteurs déployé à grande échelle à l'intérieur d'un ouvrage. Ce système sera conçu sur la base de transformer les puits stationnaires en mobiles où le drone porte les puits et volent

à travers la zone de surveillance pour assurer la communication entre les capteurs situés à l'intérieur de la structure et la station de base.

Etant donné que les limitations de distances sont surmontées, les puits pourront envoyer un signal de réveil continu pour activer les nœuds de capteur et les télé-alimenter pour la partie communication. Cette solution permettrait d'utiliser d'autres types de module radio constituant le nœud de capteur et permettant peut-être de gagner en durée de vie au niveau du nœud et en plus nous pourrions associer à ces mesures une inspection visuelle si on équipe les drones de caméra. Il faudra bien sûr optimiser la consommation d'énergie au niveau du drone. Car la télé-alimentation des nœuds de capteurs, nécessite un niveau de puissance non négligeable (dépend de la distance drone étiquette).

Bibliographie

- [1] M. Mechbal « contrôle santé des structures Nacelles pour Moteurs d'avion » Doctorat, Ensam, paris, 2012.
- [2] D. Balageas « Introduction au contrôle de santé structurale intégré » Revue de l'Electricité et de l'Electronique, Chatillon, Janvier 2006.
- [3] R. Hajraya « Contrôle santé des structures Composites : Approche Expérimentale et Statistique » Doctorat, Paris Tech, 2012.
- [4] Su, Z, and Ye, L. (2009) « Identification of damage using Lamb Wave » Springer. Berlin, Germany.
- [5] V. Le Cam « Capteurs communicants pour les infrastructures de transport » IFSTTAR , 7th European Workshop Structural Health Monitoring , Nantes, 2014.
- [6] M. Sofiane MOAD « La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. » Etude bibliographique Master Recherche 2 en Informatique IFSIC-Rennes 1, Année universitaire 2007/2008.
- [7] M. Omer Farooq and T. Kunz « Operating Sensor Networks : A survey » Sensors, Volume 11, page 5900-5930, 2011.
- [8] D. Dessales « Conception d'un réseau de capteur sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation » Doctorat, Université de Poitiers, 2006.
- [9] C. Tidjane « Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension » Doctorat, Nancy I, 2011.
- [10] A. Makhoul « Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données. » Université de Franche-Comté, 2008.

[11] B. Amar Bensaber « Introduction à la sécurité des réseaux de capteurs sans fil » Ecole d'été, Université de Bejaia, 2013.

[12] G. Xu, W. Shen and X. Wang “Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey” Sensors review, volume 14, pages 16932-16954, Guangdong Ocean University, China and Western Ontario university, Canada, September 2014.

[13] J. Lester Hill « System Architecture for Wireless Sensor Networks » Phd, University of California, 2000.

[14] M. Nafees Rahman, M. A. Matin « Efficient Algorithm for Prolonging Network Lifetime of Wireless Sensor Networks » Tsinghua science and technology, December 2011.

[15] Yen Kheng Tan, Sanjib Kumar Panda « Self autonomous wireless sensor nodes with wind energy harvesting for remote sensing of wind-driven wildfire spread » IEEE Transactions on instrumentation and measurement, April 2011.

[16] Edward Sazonov, Haodong Li, Darrell Curry and Pragasen Pillay « Self-Powered sensors for monitoring of highway bridges » IEEE Sensors Journal, volume 9, number 11, November 2009.

[17] Kevin M. Farinholt, Nathan Miller, Wilfredo Sifuentes, Jason MacDonald, Gyuhae Park and Charles R. Farrar « Energy harvesting and wireless energy transmission for embedded SHM sensor nodes » Engineering institute MS T001, Los Alamos National Laboratory, volume 9, 269-280, Los Alamos, USA, March 2010.

[18] M. Kovatsch “ Services for Wireless sensor networks – A design for Health Monitoring and Motivation Analysis” Thesis diploma, university of Erlangen-Nuremberg, Germany, 2008.

[19] F. Stajano, N. Hoult, I. Wassell, P. Bennett, C. Middleton and K. Soga « Smart Bridges, Smart Tunnels: Transforming Wireless Sensor Networks from Research Prototype into Robust Engineering Infrastructure » Cambridge, UK 2009.

[20] C.Gross, S. D. Glaser, M. Kruger « Condition monitoring of concrete structures using wireless sensor networks and MEMS» Smart structures and materials: Sensors and smart structures technologies for civil, mechanical and aerospace systems, pp. 407-418, 2006.

[21] Jong Woong Park, Soojin Cho, Hyung-Jo Jung, Chung-Bang Yun “Long-term structural health monitoring system of a cable-stayed bridge based on wireless smart sensor networks and energy harvesting techniques » 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, July 11-15, 2010.

[22] Monitoring of Concrete Structures Using Passive Type RFID Tags with Sensory Functions OGAWA, Shoichi and SATO, Tatsuzo Research & Development Center, Taiheiyo Cement Corporation 2-4-2, Osaku, Sakura City, Chiba Prefecture 285-8655, Japan, 2006.

[23] San-Shan Hung, Chih-Yuan Chang, Hsing-Cheng Chang, Hsin-Yi Feng ‘Packaged Wireless Multisensor Module Embedded Reinforced Concrete for Monitoring Construction Characteristics’ 11th international conference on electronic packaging technology and high density packaging, pp. 1293-1296, 2010.

[24] W. Quinn, P. Angove, J. Buckley, J. Barrett and G. Kelly “ Design and performance analysis of an embedded wireless sensor for monitoring concrete curing and structural health” journal of civil Structural health monitoring, Volume 1, pp. 47-59, 2011.

[25] S. Orłowska « Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites a deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale » Doctorat, Ecole centrale de Lyon 2003.

[26] International conference on indoor positioning and indoor navigation “Concrete embedded RFID for way-point Positioning” 2010, Zurich, Switzerland.

[27] Soustos M.N., Bungey J.H., Millard S.G., et al.2001. “Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing” NDT&E International, Vol. 34, pp 419-425, 2001.

-
- [28] Roger A. Dalke, Christopher L. Holloway, Paul McKenna, Martin Johansson, and Azar S. Ali "Effects of Reinforced Concrete Structures on RF Communications" IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol. 42, N°. 4, November 2000.
- [29] M. Essaid Achour, A. Droussi, F. Lahjomri et A. Oueriagli « Modélisation des propriétés diélectriques des nano composites » Afrique science 05. Maroc, 2009.
- [30] M. Adous « Caractérisation Électromagnétique des matériaux traités de Génie Civil dans la bande de fréquences 50 MHz-13 GHz » Doctorat, université de Nantes, 2006.
- [31] Robert A. "Recherche de méthodes d'interprétation des mesures géo radar et de thermographie infrarouge appliquées au contrôle non destructif et à l'auscultation in situ des matériaux de construction", Thèse de Doctorat de l'EPFL, Lausanne, 1997.
- [32] A. Jardot « Mesures en cavité résonante : Caractérisation diélectrique des matériaux du génie civil » Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen Centre d'Études Techniques de l'Équipement Normandie Centre, ERA 23, 2009.
- [33] B. Filali, J. Rhazi, F. Boone, G. Ballivy « Design and calibration of a large openend coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete » IEEE transactions on microwave theory and techniques, volume 56, numéro 10, pp. 2322-2328, Université de Sherbrooke, 2008.
- [34] Tanguy Jaffre «Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multi périodiques et leurs applications aux antennes» Doctorat de l'université de Limoges, février 2005.
- [35] F.Goy « caractérisation de diélectrique dans l'intervalle (17-700 GHz) » JCMM 92, journée d'étude, Octobre 1992.
- [36] A. Peden, D. Bourreau « Mesures en espace libre sans filtrage temporel : caractérisation large bande de matériaux en bande Ka et W » JNM 2001.
- [37] M. Dormer "Choice of frequency band can really make a difference" Electronics World magazine, June 2008.

-
- [38] Shan Jiang “Optimum Wireless Power Transmission for Sensors Embedded in Concrete” Phd thesis, Florida International University Digital Commons FIU, 2011.
- [39] R. Paknys “Reflection and transmission by reinforced concrete – Numerical and asymptotic analysis” IEEE Trans. antennas and propagation, vol.51, number 10, 2852-2861, October 2010.
- [40] E. Richalot, M. Bonilla, M.Wong, V. Fouad-Hanna, H. Baudrand and J. Wiart “Electromagnetic Propagation into Reinforced-Concrete Walls” IEEE Transactions on microwave theory and techniques, volume 48, 357-366, March 2000.
- [41] Liu Ping; Chen Gui; Long Yun-liang “Effects of reinforced concrete walls on transmission of EM Wave in WLAN “ Microwave and Milimeter Wave Technology International Conference, 2008.
- [42] ESINSA 5^{ème} année option Télécommunication- Télédétection T.P. Télécommunication Antennes 1.
- [43] G. Villemaud « Caractéristiques générales des antennes » Cours d’antennes, INRIA, 5^{ème} année du département Génie Electrique.
- [44] A. Boyer « Antennes » Support de cours, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 5^{ème} année Réseau Télécom, 2011
- [45] D. Grenier « Antennes et propagation radio » Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, Canada, 2015.
- [46] Constantine A. Balanis « Antenna theory; analysis and design » second edition, Arizona State University, 1997.
- [48] B. Bensahla-Tani « Contribution à la conception et à la réalisation d’émetteurs récepteurs monolithiques 140 GHz pour réseaux de capteurs sans fil » Doctorat Lille 1, 2013.
- [49] E. Herth « Conception et réalisation d’antennes en bande millimétrique à base de MEMS RF pour des applications Télécoms et Contrôle non Destructif » Doctorat, université Lille1, 2009.

[50] M. Hassad « Modélisation d'une antenne patch péalisée sur un substrat à tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux » Magister en Electronique, université de Batna, Algérie, 2009.

[51] A. El Ouadih, A. Oulad Said, M.M Hassani « Comparaison du modèle des éléments finis et du modèle de la cavité pour la conception d'une antenne patch rectangulaire miniaturisée et alimentée par une ligne coaxiale pour la bande ISM de 2.4 GHz » Telecom 2013 et 8^{ème} JFMMA, Maroc, Mars 2013.

[52] V. Patrick « Les antennes imprimées » Master Recherche Télécommunications Hautes Fréquences et Optiques IRCOM Université de Limoges, 2014.

[53] « De la ligne micro ruban à l'antenne patch » Mini-Projet WLAN Polytech, Nice 2011-2012.

[54] D. K. Misra and K. Fenske, "Dielectric Materials at Microwave Frequencies," Applied Microwaves and Wireless, vol. 12, no. 12, pp. 92-100, October 2000.

[55] L. Rindorf and K. Bjarne Jakobsen “ Small and robust antennas for concrete embedded sensors” Loughborough Antennas and Propagation conference, UK, 2009.

[56] A. Chafik, F. Lepage “ Topologie et performance d'un réseau de capteurs en mobilité cyclique” Université Nancy, France, .2011.

[57] G. Kaur, R. Mohan Garg “Energy efficient topologies for wireless sensor networks” International Journal of distributed and parallel systems, volume 3, number 5, India, September 2012.

[58] D. Sharma, S. Verma and K. Sharma “ Network topologies in wireless sensor networks : A review” ISSN: 2230-709, Chandigarh, India, 2013.

[59] L. E. Frenzel « A dozen top Application for mesh network” Electronic Design, September 2005.

[60] J. Henaut, D. Dragomirescu, R. Plana « Développement d'un réseau de Capteurs pour des Applications Aérospatiales : Topologie réseau et interface Radio » Rapport LAAS numéro 10295, Toulouse, Mai 2010.

[61] « Range calculation for 300 MHz to 1000 MHz communication Systems » Atmel application note, 2010.

[62] Norris, A, Saafi, M & Romine, P 2008, 'Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/micro-electro-mechanical systems (MEMS) sensors' Construction and Building Materials, vol 22, no. 2, pp. 111-120. 2010.

[63] J.K. Kim, S.C. Lee “Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages” J. Cement Concr Res, 29 (1999), pp. 1921–1927.

[64] J.M. Terril, A.R. Richardson “Non linear moisture profiles and shrinkage in concrete members” Mag Concr Res, pp. 220–225, 1986.

[65] M. Brunet “ Mécanique des matériaux et des structures” Master génie mécanique, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2012.

[66] V. Lanticq « Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil ». Thèse en communication électronique, Teleco ParisTech, 2008.

[67] N. Rosin-Corre, C. Noret « L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience » Auscultation et suivi des ouvrages, Paris, 2012.

[68] Y. Silkali Mamdem « Capteurs à fibres optiques réparties par effet Brillouin : Séparation de la dépendance à la température et à la déformation » Doctorat Telecom Paris tech, 2012.

[69] L. Jérôme « Vers le déploiement d'un réseau de capteurs enfouis dans des multi-plies carbone-époxy pour l'instrumentation in-situ de structures composites pour l'avionique » thèse en Micro Nano systèmes, université Toulouse, 2012.

[70] National Instruments Measurement « Measuring strain with strain gages » Measurement Fundamentals series, Nov 04, 2014.

-
- [71] Y. Debard « Résistance des matériaux : élasticité, méthodes énergétiques, méthode des éléments finis » Institut universitaire de technologie du Mans, 2011
- [72] Guennoun « Spécification pour massifs de charpentes et d'appareillage » Cahier des spécifications techniques générales, Janvier 1998.
- [73] C. Blaise Kognonsa « Méthodologie de dimensionnement des fondations d'ouvrages d'art en béton armé : Application aux ponts-routes sur micros-pieux » Projet de fin d'études ingénieur en génie civil, Dakar, 2004.
- [74] A. Mejdoubi « Etude par simulation numérique des propriétés diélectrique d'hétéro structures multiphasiques contenant des inclusions de forme arbitraire » Doctorat de l'université de Bretagne Occidentale, 2013.
- [75] F.Sagnard, G. El Zein « Caractérisation de matériaux en ultra-large bande » école d'automne Ultra-large band, Rennes, Octobre 2006.
- [76] N. Bounegta « Approche distribuée pour la sécurité d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) » Université de Bechar - Ingénieur d'état en informatique 2010.
- [77] D. Dessales « Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation » Doctorat, université de Poitiers, 2011.
- [78] R. Igual Perez « Impact des interférences sur la consommation énergétique d'un nœud de réseaux de capteurs sans fil » XIXème journée nationales Microondes, Bordeaux, 2015.

Listes des figures

Figure 1.1 : Effondrement du pont d’Injaka, en juillet 1998	10
Figure 1.2: Exemple d’architecture d’un réseau de capteurs sans fil	12
Figure 1.3: les composants d’un nœud de capteurs	13
Figure 1.5: Le premier site de déploiement	20
Figure 1.6: Pont du Ferriby Road	21
Figure 1.7 : Tunnel ligne Jubilee	21
Figure 1.8: Schéma d’un système de surveillance sans fil d’un ouvrage à l’aide des techniques de transmission radio	22
Figure 1.9 : Architecture du capteur (Smartmote) employé dans le test	22
Figure 1.10 : Pont Jindo	23
Figure 1.11 : Nœud capteur sans fil assemblé à l’aide d’Imote2 (à gauche) et de différents capteurs de surveillance de santé structurale (SHM). DAQ: dispositif d’acquisition de données	24
Figure 1.12: Présentation des Capteurs dans le deuxième pont Jindo avec un total de 661 canaux de données	25
Figure 1.13: Propriétés modales extraites	25
Figure 1.14: Capteur de déformation (en bleu)	27
Figure 1.15: influence des armatures sur la distance de communication	27
Figure 1.16: Influence du béton sur la distance de communication	28
Figure 1.17: configuration expérimentale du capteur dans le béton	29
Figure 1.18: Mesures de température avec le capteur sans fil et avec le Pt-100 enfouis dans le béton sur une évolution de 105 heures	29
Figure 1.19: Prototype du capteur et du boîtier	30

Figure 1.20: Conditions de construction de l'expérience(a)Installation (b) Emplacement de capteurs	30
Figure 1.21: Mesures de température en fonction du temps.....	31
Figure 1.22: Mesures d'humidité relative en fonction du temps	32
Figure 2.1: Atténuation par mètre en fonction de la fréquence pour une gamme d'échantillons de béton.....	42
Figure 2.2 : Influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques des bétons en fonctions de la fréquences (Soutos M.N,2001)	43
Figure 2.3 : Ferrailage d'un poteau.....	44
Figure 2.4 : Milieu homogénéisable	45
Figure 2.5 : Schéma du dispositif de mesure de la capacité à plan parallèle.....	47
Figure 2.6 : Photo de la cavité résonante cylindrique.....	48
Figure 2.7: (a) Schéma de mesure en guide d'onde rectangulaire (b) Schéma de mesure par ligne de transmission coaxiale	48
Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'une sonde coaxiale.....	49
Figure 2.9 : Schéma de mesure en espace libre	50
Figure 2.10: Deux antennes noyée dans le béton.....	53
Figure 2.11: Banc de caractérisation.....	55
Figure 2.12: Représentation Polaire du diagramme de rayonnement.....	56
Figure 2.13: Régions du champ d'une antenne.....	59
Figure 2.14 : Rayonnement (a) d'une antenne Yagi, (b) d'une antenne Vivaldi et (c) d'une antenne Patch.....	61
Figure 2.15: Structure d'une antenne patch	63
Figure 2.16: La configuration géométrique sur HFSS de 2 antennes patch noyés dans une boîte d'Air.....	67
Figure 2.17: Boitier d'air d'une antenne Patch noyé dans le béton (c)	67

Figure 2.18: Coefficients de réflexion d'une antenne Patch (a) dans l'air, (b) dans le béton sec sans boitier, (c) dans le béton humide sans boitier, et (d) dans le béton avec un boitier.....	68
Figure 2.19: Module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies dans le béton sec en variant les tangentes de pertes	69
Figure 2.20 : Module du coefficient de transmission en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies dans le béton sec en variant les tangentes de pertes	69
Figure 2.21 : Module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies dans l'air, le béton sec et le béton humide (avec des boitiers d'air)	70
Figure 2.22: Module du coefficient de transmission en fonction de la fréquence pour des antennes Patch enfouies des boites d'air, de béton sec et humide	71
Figure 2.23: Positionnement de l'alimentation coaxiale de l'antenne.....	72
Figure 2.24 : Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour antenne optimisée et noyée dans du béton	72
Figure 2.25: Antennes patch (a) sans boitier (b) avec un boitier en polystyrène...	73
Figure 2.26: Coefficients de réflexion des 2 antennes patch dans l'air	73
Figure 2.27: Ecoulement du béton sur les deux antennes patch	74
Figure 2.28: Coefficients de réflexion des 2 antennes patch enfouis dans le béton sec en simulation et en expérimentale	75
Figure 2.29: Coefficient de transmission des 2 antennes patch enfouis dans le béton en fonction du temps.....	76
Figure 2.30: Configuration géométrique des 2 antennes patch noyées dans le béton	77
Figure 2.31: Coefficients de réflexion des 2 antennes patch en simulation et en expérimental.....	77
Figure 2.32: Coefficients de transmission des 2 antennes patch en simulation et en expérimental.....	78

Figure 2.33: Configuration géométrique d'antenne patch positionnée a) derrière b) entre et c) avant les armatures.....	79
Figure 2.34: Coefficients de réflexion pour différentes positions des antennes patch.....	79
Figure 2.35: Coefficients de transmission pour différentes positions des antennes patch.....	79
Figure 2.36: Configuration géométrique des 2 antennes patch, la première attachée aux armatures dans le béton et la deuxième dans l'air	80
Figure 2.37 : Coefficients de réflexion à 860MHz pour des longueurs de grilles : 11, 15 et 20cm.....	81
Figure 3.1 : Différentes topologies de RCSF.....	87
Figure 3.2: Schéma de principe d'une liaison hertzienne.....	88
Figure 3.3 : Topologie réseau de capteurs sans fil choisie	91
Figure 3.4 : Schéma du bilan de liaison d'une étiquette RFID passive	92
Figure 3.5: Topologie réseau de capteurs local	93
Figure 3.6: Gain réalisée de l'antenne Cornet dans l'air	94
Figure 3.7 : Topologie de réseau de capteur local	95
Figure 3.8 : Coefficient de transmission S_{21} de l'antenne du puits se situant sur l'axe de l'antenne du nœud	95
Figure 3.9 : Communication entre une antenne patch noyée dans le béton et une antenne située dans l'air.....	96
Figure 3.10 : Model de simulation de 6 antennes patch noyées dans le béton	97
Figure 3.11 : Coefficients de réflexion des 6 antennes patch noyées dans le béton	98
Figure 3.12: Exemple mesures de courant avec la plateforme Synergie	99
Figure 3.13 : Configuration réseau de capteurs sans fil	101
Figure 3.14: diagramme contrainte - déformation	103

Figure 3.15: Définition du tenseur des contraintes	104
Figure 3.16 : Effet d'une compression et d'un cisaillement sur le cube unité.....	105
Figure 3.17 : Capteur à corde vibrante destiné à être placé à l'intérieur du béton	105
Figure 3.18 : Principaux éléments des fibres optiques	106
Figure 3.19 : capteur à fibre optique.....	107
Figure 3.20 : Diagramme d'une jauge	107
Figure 3.21: Montage en Pont de Wheatstone	109
Figure 3.22 : Montage en Demi-pont.....	110
Figure 3.23 : Montage en quart de pont 2 fils.....	110
Figure 3.24: Montage en quart de pont 3 fils.....	111
Figure 3.25: Jauges de déformation avec : a) 120 Ω b) 1000 Ω	111
Figure 3.26 : Boitier du capteur de température et d'humidité.....	115
Figure 3.27: Mesures de température et d'humidité relatives de la vapeur d'eau pendant 1 heure	116
Figure 3.28 : Capteur de température et d'humidité noyé dans la caisse de béton	116
Figure 3.29 : Mesures de températures internes du béton effectuées pendant une semaine	117
Figure 3.30: Mesures d'humidité internes du béton effectuées pendant une semaine	118
Figure 3.31: Structure en béton armé TOTEM	119
Figure 3.32: Etat de contrainte principal	119
Figure 3.33: schéma d'une structure en béton	120
Figure 3.34 : Modélisation 3D de la structure	121

Figure 3.35 : Contrainte de Von mises Avec : (a) structure sans boites d'air et (b) structure avec des boites d'air de dimensions (8 x8 x 5) cm ³	121
Figure 3.36 : Déplacement total (m) Avec : (a) structure sans boites d'air et (b) structure avec des boites d'air de dimensions (8 x8 x 5) cm ³	122
Figure 3.37 : Moule de la structure en béton armé	123
Figure 3.38: Schéma du massif.....	125
Figure 3.39: Ferrailage du massif de la structure « TOTEM »	128

Listes des tables

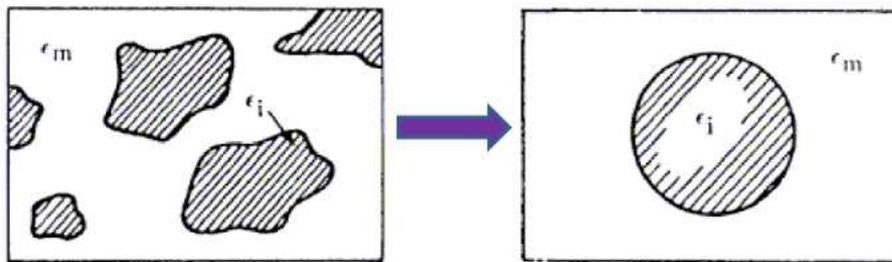
Tableau 1.1: Difficultés rencontrées et les solutions proposées dans les différents projets.....	32
Tableau 2.1 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de mesure de la permittivité du béton.....	51
Tableau 2.2: Différents types d'antennes planaires	60
Tableau 2.3 : Coefficients de transmission à 860MHz pour des longueurs de grilles : 11, 15 et 20cm.....	81
Tableau 2.4: Coefficients de transmission à 860MHz pour des fer-ronds de diamètre de 4mm, 8mm, 12mm et 16mm.....	82
Tableau 3.1 : Portée maximale de la communication entre deux nœuds avec des gains d'antennes de 4 et 1 dB dans des milieux de propagation différents	90
Tableau 3.2 : Portée maximale de la communication d'une étiquette RFID passive avec un gain d'antenne de 1 dB dans des milieux de propagation différents.....	92
Tableau 3.3: Coefficients de réflexion et de transmission des 6 antennes patch noyées dans le béton	98
Tableau 3.4 : Exigences de courant des composants radio, microcontrôleur et capteur d'un nœud	108
Tableau 3.5 : Caractéristiques des alliages des jauges de contrainte.....	108
Tableau 3.6: Exigences de courant pour différentes configurations de Jauges de contrainte	111
Tableau 3.7 : Avantages et limitations des capteurs de déformation.....	112
Tableau 3.8 : Caractéristique de quelques sols	124
Tableau 3.9 : Dimension du massif	126

Annexe 1

Loi des mélanges [74,75] :(mélanges avec inclusions sphériques)

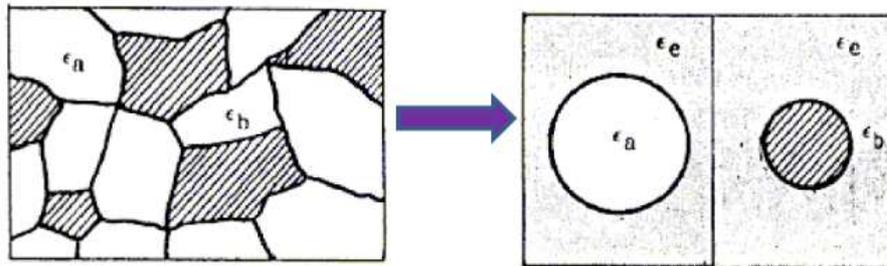
- Maxwell - Garnett (1904) :

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_m}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_m} = p \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m}$$



- Bruggeman (théorie du champ moyen) (1935) :

$$(1 - f) \frac{\epsilon_m - \epsilon_{eff}}{\epsilon_m + 2\epsilon_{eff}} + f \frac{\epsilon - \epsilon_{eff}}{\epsilon + 2\epsilon_{eff}} = 0$$



Avec :

ϵ_m : Milieu hôte

ϵ_{eff} : Milieu effectif

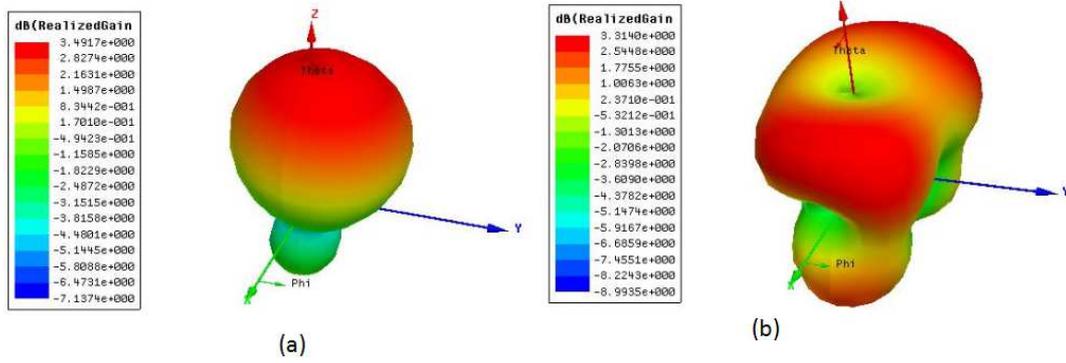
ϵ_i : Inclusion (particules)

p : Concentration volumique des inclusions

f : Fraction volumique

Annexe 2

Gain d'une antenne patch (a) dans l'air et (b) dans le béton :



Annexe 3

➤ Conditions de stabilité :

Soit le massif de dimensions a, b et h exprimées en m et soumis à des moments de renversement Mr_1 et Mr_2 calculés à sa base (voir figure 3.36). Il transmet par ailleurs au sol une charge verticale P (comprenant le poids de la structure supportée et le poids du massif).

- Les moments de renversements :

$$Mr_1 = Mf_1 + F_1(H + h) \quad \text{et} \quad Mr_2 = Mf_1 + F_2(H + h)$$

Avec Mf_1 et Mf_1 : Moments fléchissant(en m.daN).

- Si l'on suppose que la rotation du massif s'effectue autour du point 0, les moments stabilisants s'écrivent :

$$M(a) = P \frac{a}{2} + Cbh^3 \quad \text{et} \quad M(b) = P \frac{b}{2} + Cah^3$$

Où C est le coefficient de poussée des terres exprimée en daN/m³.

- La stabilité du massif est vérifiée si :

$$K Mr_1 \leq M(a) \quad \text{et} \quad K Mr_2 \leq M(b)$$

K étant le coefficient de sécurité associé à l'hypothèse étudiée.

➤ Condition de pression maximale admissible :

Pour la plupart des terres, la pression maximale admissible au fond de fouille (n) est dépassée avant d'atteindre l'instabilité, il faut donc vérifier cette condition de pression admissible.

On doit avoir : $k \cdot \frac{P}{ab} \cdot \mu \leq n$

Où μ est un coefficient d'implication des contraintes permettant de prendre en compte le déplacement du point de rotation 0.

A l'équilibre les moments par rapport au nouveau centre de rotation s'écrivent :

$$\mathbf{Mr}_1 = \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{Cb}h^3 \quad \text{et} \quad \mathbf{Mr}_2 = \mathbf{P} \mathbf{y} + \mathbf{Cah}^3$$

Donc :

$$\frac{\mathbf{x}}{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{Mr}_1 - \mathbf{Cb}h^3}{\mathbf{Pa}} \quad \text{et} \quad \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{b}} = \frac{\mathbf{Mr}_2 - \mathbf{Cah}^3}{\mathbf{Pb}}$$

Connaissant les coordonnées x et y du nouveau centre de rotation, on peut déterminer la valeur de μ à l'aide de la table de Pohl (Cf. annexe 5) pour x/a variant de 0 à 0.50 et pour y/b variant de 0 à 0.50.

Annexe 4

- Vérification aux Etats Limites de Service ELS :

Moment de stabilité,	673.0	kN.m
Moment de renversement	50.0	kN.m
Etat limite de mobilisation du sol, q	86	kPa
Contrainte de compression sous le massif, Qref	55	kPa = 0.64 q

- Vérification aux Etats Limites Ultimes ELU :

Moment de stabilité,	673.0	kN.m
Moment de renversement	88.6	kN.m
Etat limite de mobilisation du sol, q	119	kPa
Contrainte de compression sous le massif, Qref	60	kPa = 0.50 q

- Dispositions constructives du fascicule 62 article B.4

Section minimale des armatures des aciers supérieurs	30.00 cm²
Section minimale des armatures des aciers inférieurs	60.00 cm²

Liste des publications :

- ❖ Amal Abbadi, Nathalie Rolland, Isam Shahrour “Antennes Patch noyées dans le béton ” *JNRDM–17ème* Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique, Mai 2014, Villeneuve d’Ascq, France. 2014.
- ❖ Amal Abbadi, Nathalie Rolland, Isam Shahrour “Wireless Sensors Embedded in Concrete”EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul 2014, Nantes, France. 2014.
- ❖ Amal Abbadi, Nathalie Rolland, Isam Shahrour “Implementing Wireless Sensor Network to Measure Temperature, Humidity and strain inside reinforced Concrete structure” En-cours.