Numéro d'ordre : 16/18

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de

VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

Spécialité : **ELECTRONIQUE**

Présentée et soutenue par Laïd SADOUDI

Le 6/07/2016, à l'Amphithéâtre IEMN-DOAE, Université de Valenciennes

Ecole doctorale :

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie/Département d'Opto-Acousto-Electronique (IEMN/DOAE)

Etude et développement d'une plateforme de communication pour les réseaux de capteurs acoustiques sans fil. Application au Contrôle-Santé des rails par corrélation du bruit ambiant.

JURY

Président du jury

- Duchamp, Geneviève. Professeur. ESIEE PARIS, Université Paris-Est.

Rapporteurs

- Baudoin, Geneviève. Professeur. ESIEE PARIS, Université Paris-Est.
- Ech-Cherif El-Kettani, Mounsif. Maître de Conférences-HDR. Université du Havre.

Co-directeur de thèse : Assaad, Jamal. Professeur. Université de Valenciennes.

Co-directeur de thèse : Moulin, Emmanuel. Professeur. Université de Valenciennes.

Co-encadrant : Bocquet, Michaël. Maître de Conférences. Université de Valenciennes.

Membres invités

- Rivenq, Atika. Professeur. Université de Valenciennes.
- El Hillali, Yassin. Maître de Conférences. Université de Valenciennes.

"Imagination is more important than knowledge. For knowledge is limited, whereas imagination embraces the entire world, stimulating progress, giving birth to evolution."

Albert Einstein, What Life Means to Einstein (1929)

Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été effectués au Laboratoire IEMN-DOAE (Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, Département Opto-Acousto-Electronique), à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC) sous la direction de Mr. **Jamal ASSAAD**, la codirection de Mr. **Emmanuel MOULIN** et l'encadrement de Mr. **Michaël BOCQUET**.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de thèse, **Jamal ASSAAD**, Professeur à l'Université de Valenciennes pour m'avoir fait confiance et laissé des libertés d'initiative tout au long de ces années de travail en commun. De m'avoir donné cette opportunité d'effectuer mes recherches au laboratoire IEMN-DOAE et pour sa contribution à ce travail, ses explications et ses conseils pertinents.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers mon co-directeur de thèse, **Emmanuel MOULIN**, Professeur à l'Université de Valenciennes pour m'avoir fait bénéficier de son expertise et son encadrement de grande qualité notamment sur la partie acoustique. Je lui en suis gré d'avoir toujours montré de la disponibilité, de la patience ainsi que de la rigueur.

Un grand merci également à mon co-encadrant de thèse, **Michaël BOCQUET**, Maître de conférences à l'Université de Valenciennes, pour son encadrement pendant ces années de thèse. Pour son soutien et les conseils qu'il m'a prodigués aux moments opportuns. Je salue également sa personnalité à la fois sympathique, sérieuse et modeste.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury d'avoir accepté de juger mes travaux et d'avoir dégagé du temps pour vous y consacrer.

Merci au Professeur **Geneviève DUCHAMP** d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Je remercie également le Professeur **Geneviève DAUDOIN** d'avoir bien voulu être rapporteur de mes travaux. Je vous suis reconnaissant d'avoir porté votre regard d'experte sur mon manuscrit et de vos remarques pertinentes pour l'améliorer. Votre contribution est pour moi essentielle.

Docteur **Mounsif ECH-CHERIF EL-KETTANI**, vous avez aussi accepté d'être rapporteur dans mon jury. Je vous suis vraiment gré pour votre investissement dans l'évaluation de mon travail et pour votre implication très positive.

Merci beaucoup au Professeur **Atika Rivenq** d'avoir accepté de participer à mon jury. Votre implication à mes côtés a toujours été sans faille. J'ai eu la chance de vous côtoyer au cours de mon cursus de Master, puis ma thèse et vous m'avez toujours reçu avec patience et gentillesse. Ça a été pour moi un vrai privilège d'interagir avec vous et garderai un excellent souvenir de nos collaborations.

Je tiens à remercier **Yassin EL-HILLALI**, Maître de conférences à l'Université de Valenciennes, non seulement pour avoir accepté de participer à ce jury, mais aussi pour ses discussions enrichissantes, son aide précieuse, ses conseils ainsi que sa personnalité sympathique et sa modestie.

Un merci particulier à **Farouk BENMEDDOUR**, Maître de conférences à l'Université de Valenciennes, pour sa disponibilité, ses explications, ses discussions enrichissantes, ses conseils précieux ainsi que ses qualités humaines.

Je remercie tous les membres enseignants-chercheurs, personnel administratif et tous les collègues du Département Opto-Acousto-Electronique (DOAE) de l'IEMN qui, par leurs encouragements ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse. En particulier, je remercie chaleureusement mes collègues de bureau Bada NDAO et Daher DIAB pour leur sympathie et la bonne ambiance au bureau. Merci à tous les collègues doctorants pour les discussions fructueuses que nous avons pu avoir ensemble, l'ambiance profitable et agréable au travail, les pauses déjeuners conviviales au ru, les petits anniversaires improvisés au labo ainsi que les parties de bowling.

Je tiens également à remercier le conseil régional Nord Pas de calais et le pole compétitivité I-Trans d'avoir contribué au financement de ces travaux.

Evidemment, je ne peux terminer ces remerciements sans mentionner ma famille. Un grand merci à ma mère Djamila pour m'avoir soutenu pendant toutes ces années d'études, pour son amour inestimable, sa confiance, ses sacrifices et son soutien sans faille. Merci à ma sœur Fahima, mes frères : Houes, Youssef, Djamel, Nacer et Zahir, pour leur complicité, leur soutien et leur tendresse malgré la distance.

Un grand merci également à celle qui m'a supporté pendant ces années de thèse, ma femme Coralie pour son amour et son soutien.

À la mémoire de mon père
À ma mère
À mes frères, ma sœur
et
À ma femme

Table des matières

Introduction générale **1**

1 Les réseaux de capteurs sans fil et leurs applications au contrôle-santé des structures et infrastructures **5**
1.1 Introduction . . . 5
1.2 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil . . . 7
1.2.1 Mise en œuvre et déploiement des WSNs . . . 7
1.2.2 Contraintes de conception des WSNs . . . 9
1.2.3 Architecture matérielle d'un nœud capteur . . . 10
a) Sous-système d'acquisition . . . 11
b) Unité de traitement . . . 14
c) Sous-système de transmission . . . 15
d) Sous-système d'alimentation . . . 16
1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil . . . 17
1.4 Application au contrôle-santé des structures et infrastructures ferroviaires . . . 21
1.4.1 État de l'art des techniques de contrôle non destructif dans l'industrie ferroviaire . . . 21
a) Le Contrôle Non Destructif CND . . . 21
b) Les techniques de CND utilisées dans le domaine ferroviaire . . . 22
c) Le Contrôle-Santé Intégré (CSI) . . . 24
1.4.2 WSNs - CSI : Vers des infrastructures ferroviaires intelligentes . . . 26
1.4.3 Capteurs utilisés et éléments inspectés . . . 28
a) Les différents capteurs utilisés . . . 28
b) Les réseaux fixes et mobiles (embarqués) . . . 28
1.5 Objectifs et enjeux de notre travail de recherche . . . 31
1.5.1 Le CSI au sein de l'IEMN . . . 31
1.5.2 Objectif des travaux présentés dans ce manuscrit . . . 32
1.6 Conclusion . . . 33

2 Étude expérimentale de la méthode de corrélation de bruit acoustique pour le contrôle-santé passif des rails **34**
2.1 Introduction . . . 34
2.2 Fonction de corrélation - Estimateur de corrélation . . . 35
2.2.1 Fonction de corrélation : rappels . . . 35
2.2.2 Estimateur de corrélation . . . 36

2.3 Reconstruction passive de la réponse active : bases théoriques 37
2.4 Conditions de convergence vers la réponse active sur un échantillon de rail . 40
2.4.1 Capteurs utilisés 40
2.4.2 Mesure de la réponse active 42
2.4.3 Mesure de l'inter-corrélation de bruit 43
a) Dispositif expérimental 43
b) Caractérisation du générateur de bruit 44
c) Reconstruction (estimation) de la réponse active 45
2.5 Application à la détection de défaut 48
2.5.1 Sensibilité à un défaut local 48
2.5.2 Extraction des informations cohérentes 52
2.6 Conclusion 54

3 Étude et modélisation d'une plateforme de communication pour les WSN 56
3.1 Introduction 56
3.2 Description de la plateforme de communication pour les WSNs dédiée au CSI de l'infrastructure ferroviaire 58
3.2.1 Spécification des besoins 59
3.2.2 Topologie du réseau 60
3.2.3 Analyse préliminaire du système 61
a) Diagramme de cas d'utilisation relatif au coordinateur 61
b) Diagramme de cas d'utilisation relatif au nœud capteur 62
3.3 Choix de la technologie de communication sans fil 63
3.3.1 Technologies potentiellement intéressantes pour les WSNs 64
3.3.2 La technologie IEEE 802.15.4/ZigBee 67
3.4 Caractérisation du canal de propagation et portée radio 71
3.4.1 Modèles de propagation radio-fréquence 72
3.4.2 Dispositif expérimental 74
3.4.3 Mesure de l'atténuation du canal 77
3.5 Résultats de mesures, discussion et comparaison aux modèles théoriques . . . 80
3.5.1 Résultats des scénarios indoor 81
3.5.2 Résultats obtenus pour les scénarios outdoor, stade et voie ferroviaire : 85
3.6 Conclusion 86

4 Démonstrateur de CSI sans fil à détection passive : Application au contrôle-santé des rails 88
4.1 Introduction 88
4.2 Problématique de la synchronisation temporelle 90
4.2.1 Description du problème 90
4.2.2 État de l'art des techniques de synchronisation dans les WSNs 90
4.2.3 Mesure du décalage entre deux nœuds capteurs ZigBee au laboratoire 93
4.3 Proposition d'une solution de synchronisation précise, économique et flexible 96
4.3.1 Description de la solution proposée 97
4.3.2 Évaluation de la solution proposée 97
4.4 Description du prototype plateforme de WSN développé 99

4.5 Validation du prototype développé : Démonstrateur CSI-ZigBee à détection passive 104
4.5.1 Comparaison entre une transmission filaire et une transmission sans fil réalisée avec la plateforme prototype développée 105
4.5.2 Algorithmes et trames échangées dans la plateforme de communication sans fil 107
a). Algorithme de fonctionnement du coordinateur 108
b). Algorithme de fonctionnement des nœuds capteurs 108
4.5.3 Application à la détection passive de défaut 110
4.6 Les limites du système développé et perspectives d'évolution du prototype . 115
4.7 Conclusion 116

Conclusion générale et perspectives **117**

Bibliographie **121**

Table des figures

1.1 Exemple d'architecture de réseau de capteurs sans fil. 8
1.2 Anatomie typique d'un nœud capteur sans fil. 11
1.3 Processus de conversion Analogique-Numérique. (i) signal analogique, (ii) signal échantillonné, (iii) signal quantifié. 13
1.4 Signal d'origine de fréquence $f = 0.5Hz$, acquis avec différentes fréquences d'échantillonnage : (a) fréquence d'échantillonnage adéquate $f_{ech} = 4Hz$, (b) fréquence d'échantillonnage insuffisante, $f_{ech} = 0.66Hz$, ce qui conduit au problème de repliement. 14
1.5 Typologie des réseaux de capteurs sans fil. 17
1.6 Classification des applications des WSN. 18
1.7 Architecture du système PinPtr 19
1.8 WSNs pour la surveillance et le suivi de l'activité des volcans 20
1.9 Configurations possibles pour un système de CSI. (a) plusieurs émetteurs/plusieurs récepteurs. (b) 1 émetteur, plusieurs récepteurs. (c) pas d'émetteur, plusieurs récepteurs. 25
1.10 Les fonctionnalités d'un système SHM en forme d'escalier. Plus le niveau est élevé, plus la fonctionnalité est complexe. 27
1.11 Reconstruction de la fonction de Green entre deux points à partir de la corrélation des bruits acoustiques mesurés en ces deux point. 32
1.12 Surveillance passive des structures par un système de CSI basé sur la technologie ZigBee. 33

2.1 Photo d'une section transversale de l'échantillon de rail utilisé dans cette étude. 40
2.2 Transducteur piézo-céramique 41
2.3 Module et phase de l'impédance électrique mesurée dans un premier temps pour un transducteur à vide ensuite pour un transducteur collé sur le rail. (a) : Module, (b) : Phase 42
2.4 Dispositif expérimental. Expérience d'émission-réception active. 42
2.5 Réponse typique mesurée par le récepteur au point B quand le transducteur A est excité par un train d'impulsions sinusoïdales d'un cycle à 50 kHz. . . . 43
2.6 Dispositif expérimental. Mesure de l'inter-corrélation de bruit. 43
2.7 Exemple de signal généré par la source de bruit utilisée de durée 100 ms. . . 44
2.8 Auto-corrélation du signal généré par la source de bruit utilisée. L'auto-corrélation est estimée sur 10 acquisitions d'une durée de 100 ms et une fréquence d'échantillonnage $f_e = 500\ kHz$. 44

2.9 Densité spectrale de puissance du signal généré par la source utilisée dans la bande de fréquence 1-100 kHz. 45
2.10 Influence du nombre d'acquisitions (M) sur la fonction de corrélation estimée. (a) Les premiers paquets d'ondes de $\widetilde{R}^{(1)}_{AB}(t)$. (b) Zoom sur les formes d'onde encerclées dans (a). 46
2.11 Comparaison des parties causale (——) et anti-causale (– – –) de la fonction d'inter-corrélation estimée pour différentes valeurs du nombre de positions de sources : (a) $N = 2$, (b) $N = 5$, et (c) $N = 10$. 47
2.12 Comparaison entre la réponse active mesurée $s_{AB}(t)$ (——) et $\widetilde{D}^{+}_{AB}(t)$ obtenue à partir de la corrélation de bruit estimée suivant l'équation (2.25) pour $N = 10$ sources de bruit (– – –). (a) Les formes d'onde brutes. (b) Les formes d'onde avec une compensation du déphasage. 49
2.13 Photo de la simulation d'un défaut dans l'échantillon de rail en utilisant une pince étau. 50
2.14 Détection de défaut par inter-corrélation des champs de bruit entre deux points de mesures d'un échantillon de rail. 50
2.15 Sensibilité à un défaut : (a) Détection par émission-réception active $\Delta s_{AB}(t)$. (b) Détection par corrélation de bruit $\Delta\widetilde{D}^{+}_{AB}(t)$. 51
2.16 Description de l'expérience avec plusieurs distances défauts-transducteur. . . 52
2.17 Représentations spatio-temporelles en fonction des positions du défaut : (a) Réponses actives différentielles $\Delta s_{AB}(t)$, (b) : Réponses différentielles de corrélations de bruit estimées $\Delta\widetilde{R}_{AB}(t)$ avec$M = 20$ et $N = 10$. 53
2.18 Transformées de Fourier à deux dimension (2D-FT) et comparaisons aux courbes de dispersion numériques du rail. (a)2D-FT de Δs_{AB}. (b) 2D-FT de $\Delta\widetilde{R}_{AB}$. . 54

3.1 Système de surveillance-santé typique basé sur des équipements filaires. . . . 57
3.2 Vision générale d'un système de surveillance-santé structurel sans fil. 58
3.3 Topologie du WSN pour la surveillance-santé des infrastructures ferroviaires. Les dispositifs de captage sont montés sur les nœuds capteurs attachés à l'objet surveillé. Des exemples d'infrastructures incluent les voies ferrés, les ponts et les tunnels ferroviaires. 60
3.4 Identification des acteurs du système. 61
3.5 Diagramme de cas d'utilisation relatif au coordinateur. 62
3.6 Diagramme de cas d'utilisation relatif au nœud capteur. 63
3.7 Schéma de principe d'un système RFID. 65
3.8 Types de couplage pour les systèmes RFID. 65
3.9 Topologies LR-WPAN 66
3.10 Réseau scatternet Bluetooth 67
3.11 La pile protocolaire ZigBee simplifiée 69
3.12 Structure de la supertrame [1]. 70
3.13 Photo d'un nœud capteur utilisé dans cette étude. 75
3.14 Configuration du module radio avec le logiciel XCTU. 75
3.15 Détermination du gain de l'antenne PSKN3-2400 76

3.16 Photo de la mesure du mode prédominant et de la valeur de la puissance maximale en sortie du module XBee par l'intermédiaire d'un analyseur de réseau. 77
3.17 Scénario de mesure du paramètre RSSI en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur dans une chambre anéchoïque. 78
3.18 Scénarios de mesure : (a) Hall de laboratoire et (b) Environnement de type couloir. 79
3.19 Plan des bureaux considérés dans cette étude. 79
3.20 Scénario de mesure dans un environnement dégagé : stade 80
3.21 Scénario de mesure dans un environnement de type voie ferroviaire. 81
3.22 Résultats obtenus de la campagne de mesures dans la chambre anéchoïque comparés au modèle de Friis. 82
3.23 L'atténuation mesurée comparée aux modèles théoriques Friis et log-normal : (a) scénario hall de laboratoire et (b) scénario couloir. 83
3.24 Comparaison entre l'atténuation moyenne obtenue par les mesures et l'atténuation prédite par les modèles Motley-Keenan pour (n = 3.2, $P_k = 1$ et $P_m =$ 2.5, 1.4, 1.5 et 6 $[dB]$) pour les scénarios : (a) inter-classes et (b) inter-bureaux. 84
3.25 Comparaison entre l'atténuation moyenne obtenue par mesure, l'atténuation prédite avec le modèle Motley-Keenan (n = 2 and $Pm = 2.5$ $[dB]$) et l'atténuation prédite avec le modèle ITU-R pour les scénarios : (a) inter-classes et (b) inter-bureaux. 85
3.26 Comparaison de l'atténuation moyenne obtenue par mesure et l'atténuation prédite par les modèles Friis, 2 rayons et Log-normal shadowing pour les scénarios (a) stade et (b) voie ferroviaire. 86

4.1 Mesure du retard (décalage) entre deux nœuds capteurs dans un réseau ZigBee (XBee). 94
4.2 Zoom sur l'oscilloscope pour visualiser le retard entre deux nœuds capteurs munis de modules XBee. 94
4.3 Décomposition du retard de paquet dans une liaison sans fil ZigBee. 96
4.4 Mesure de l'erreur de synchronisation entre deux nœuds capteurs. 98
4.5 Variation de l'erreur de synchronisation (S_{dev}) entre les deux nœuds capteurs en fonction du temps. 99
4.6 Vue d'ensemble de l'architecture de la plateforme WSN développée. 100
4.7 Les éléments composants chaque nœud capteur du prototype WSN développé. (a) Plateforme Arduino Due. (b) Circuit de conditionnement. (c) Module Xbee PRO. (d) Module MRF24J40. (e) Transducteur piézoélectrique. 101
4.8 Schéma simplifié de la gestion du réseau. 103
4.9 Apparence finale de la plateforme prototype développée. (a) nœud capteur. (b) station de base. 104
4.10 Dispositif expérimental. (a) Expérience avec système filaire. (b) Expérience avec système sans fil. 105
4.11 Signaux reçus au niveau de l'ordinateur (station de base). (a) Signaux obtenus avec le système filaire. (b) Signaux obtenus avec le système sans fil 106
4.12 Algorithme de fonctionnement du coordinateur. 108

4.13 Diagramme de fonctionnement des nœuds capteurs. (a) algorithme de fonctionnement de chaque nœud capteur. (b) algorithme d'échantillonnage. . . . 109
4.14 Algorithme développé pour la création des trames TX → RX. 110
4.15 Format des trames de données. (a) format d'une trame TX → RX. (b) format d'une trame RX → PC. 110
4.16 Dispositif expérimental pour la mesure des intercorrélations de bruit. Les transducteurs A et B sont utilisés comme récepteurs et sont reliés à des nœuds ZigBee. Les émetteurs S_i sont alimentés successivement par un générateur de bruit électrique. 111
4.17 Photos montrant une vue générale du dispositif expérimental. 112
4.18 Signaux typiques reconstitués au niveau de la station de base. Ils correspondent aux réponses mesurées par les transducteurs aux points A et B quand un transducteur S_i est excité par un générateur de bruit. 112
4.19 Corrélations de bruits mesurées pour les trois situations : référence $\widetilde{R}_{AB}^{\mathrm{ref}}(t)$, en présence de défaut $\widetilde{R}_{AB}^{\mathrm{def}}(t)$ et en retirant le défaut $\widetilde{R}_{AB}^{\mathrm{free}}(t)$. 113
4.20 Sensibilité à un éventuel défaut sur le rail. Corrélations différentielles sans défaut : $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{free}$ et avec défaut : $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}$. (a) résultats obtenus avec le système filaire (câble GPIB, système présenté au chapitre deux). (b) résultats obtenus avec le système sans fil. 114

Liste des tableaux

1.1 Exemples des nœuds existants sur le marché. 12
1.2 Comparaison des différents microcontrôleurs utilisés par les constructeurs des nœuds capteurs. 15
1.3 Comparaison des modules radio. 16
1.4 Les capteurs utilisés avec les WSNs dans la surveillance des structures ferroviaires, inspiré de [2]. 29

2.1 Caractéristiques techniques des transducteurs utilisés 41

3.1 Bandes de fréquence et fréquences allouées à la technologie RFID 64
3.2 Tableau comparatif des technologies de communication sans fil 68
3.3 Débit en fonction de la fréquence de la modulation 69
3.4 Valeurs typiques du paramètre n 73
3.5 Valeurs typiques du paramètre σ_{dB} 73
3.6 Les valeurs du coefficient de perte [3] utilisées pour les différents tests présentés sur les FIGURES 3.24.a et 3.24.b. 84

4.1 Tableau de comparaison et de synthèse des techniques de synchronisations discutées dans la littérature. 93
4.2 Mesure du retard entre deux nœuds ZigBee (XBee) pour plusieurs tests. . . . 94
4.3 Calcul de l'erreur de synchronisation entre deux nœuds capteurs. 98

Introduction générale

La sécurité dans les transports est un enjeu capital qui engendre une quantité de travaux conséquents. Bien que l'attente vienne en grande partie des exploitants, au vue des risques, les gouvernances des pays sont également concernées. Le transport quel que soit son mode (aéronautique, maritime, ferroviaire, etc.), est une activité qui comporte des risques importants du fait de la vitesse liée au déplacement des parties mobiles (appareils, véhicules, cabines, etc.) et des charges lourdes imposées. D'autre part, les transports collectifs impliquent que la moindre défaillance prend des proportions considérables, l'accident ferroviaire de Brétigny-sur-Orge en 2013 en est un triste exemple.

Dans le domaine ferroviaire, les véhicules utilisent la faible résistance du mouvement entre la roue et le rail afin d'être un mode de transport propre et économique en énergie. Le développement des trains rapides et l'augmentation des charges imposées, affectent l'interaction dynamique véhicule-voie. Cette interaction contribue fortement au confort de roulement, à la sécurité, à la stabilité du véhicule, aux forces roue-rail ainsi qu'à la propagation du bruit, etc. et est influencée par divers facteurs. La sécurité est l'élément primordial de la qualité du service et de l'exploitation des chemins de fer. En effet, l'état des roues et des rails ont un impact essentiel sur la sécurité ferroviaire. Par conséquent, avoir des voies et des véhicules ferroviaires dans un état acceptable est une préoccupation majeure pour les opérateurs et les exploitants d'infrastructures. De plus, les matériaux, pièces et structures utilisées dans ce secteur sont soumis à des conditions de fonctionnement sévères (conditions climatiques, choques, charges lourdes, trafic dense, actes de vandalisme, etc.) qui provoquent endommagements, dégradations, déformations et vieillissements prématurés. Ces matériaux nécessitent une maintenance accrue et régulière qui se traduit par des coûts importants pour les exploitants du réseau. Détecter et prévenir les zones à risques potentiels qui peuvent conduire à des accidents est la première préoccupation des gestionnaires d'infrastructures. C'est dans ce contexte que les méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) ont été introduites.

Au cours de ces dernières décennies, les techniques d'évaluation non destructives des structures ont fait un grand pas. Dans le domaine ferroviaire en particulier, les inspections humaines pour la détection de défauts et/ou oublie de pièces s'avèrent parfois la seule solution [4, 5]. Suite aux progrès technologiques du monde industriel, des méthodes de contrôle dites surfaciques (visuel, optique, ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault, thermographie infrarouge, bruit ferromagnétique), ou volumiques (radiographie, ultrasons, ondes guidées, impédance, résonance) se sont développées [6, 7, 8, 9, 10]. Bien qu'efficaces, celles-ci nécessitent habituellement une planification des interventions en fonction du trafic. Cela

conduit à la perturbation et dans certains cas, l'arrêt périodique du service ferroviaire, ce qui représente un manque à gagner significatif pour les entreprises du secteur. D'autres aspects importants sont aussi impliqués : la fiabilité et la sécurité des usagers. En effet, il est possible que des problèmes techniques imprévus apparaissent entre deux inspections et peuvent causer des dommages coûteux, avec éventuellement, des conséquences dramatiques.

Pour améliorer la sécurité des usagers, concevoir des structures plus sûres et durables est un enjeu majeur. Du milieu scientifique de nouvelles technologies de détection ont émergées. Elles sont utilisées pour identifier l'apparition d'endommagements structurels et les situations à risques, soit dès les phases de fabrication de la structure (des défauts liés à la construction ou fabrication), ou pendant son utilisation afin de prévenir l'apparition d'anomalie, le vieillissement ou contrôler sa qualité. Cet ensemble de nouvelles technologies, appelé Contrôle-Santé Intégré (CSI), offre une méthode automatisée pour le suivi de la santé d'une structure. Ces systèmes de CSI peuvent être trouvés dans un certain nombre de structures y compris les avions, les navires, les structures civiles, etc. Un tel système est responsable de la collecte des mesures, à partir d'un certain nombre de capteurs installés dans la structure, leur rapatriement vers une station de base pour le stockage et le traitement.

Afin de garantir des mesures fiables, l'utilisation des câbles (coaxiaux, fibres, etc.) pour la communication entre les capteurs et la station de base est souvent la seule solution. Bien que ceux-ci offrent un lien de communication tangible, leur installation dans les structures peut altérer le fonctionnement normal de celle-ci et peut s'avérer très coûteuse. De plus, pour couvrir les structures de grand volume, il faut installer plusieurs capteurs. Ainsi, plus le nombre de capteurs installés est important, plus le coût d'installation peut croître rapidement. En effet, les systèmes de CSI basés sur des communications filaires imposent des coûts d'installation élevés et soulèvent un problème de maintenance. Ces problèmes sont notamment connus dans le domaine de la surveillance des structures civiles. Des problèmes similaires sont rencontrés dans les systèmes de surveillance installés dans plusieurs modes de transport. Pour ces raisons, le concept des infrastructures intelligentes avec, en particulier, une capacité de contrôle continu est actuellement d'un intérêt croissant. Les systèmes de surveillance ferroviaires du futur seront basés sur des capteurs intégrés, ou des systèmes embarqués sur des trains commerciaux réguliers. Dans les deux cas, ces systèmes doivent être non-intrusifs et leur consommation doit être minimisée.

Dans ce contexte du CSI, les capteurs sans fil représentent une solution prometteuse dont l'issue débouche sur des systèmes économiques. L'élimination du grand nombre de câbles conduit à une réduction des coûts d'installation pour les systèmes de CSI. Cette technologie promet aussi une surveillance plus dense grâce au grand nombre de capteurs qui peuvent être mis en réseau. Le contrôle-santé structurel réduit les besoins d'inspection humaine grâce à une surveillance automatisée, réduit les coûts de maintenance grâce à la détection précoce des anomalies avant qu'elles dégénèrent et améliore la sécurité et la fiabilité des services. Ceci est vital pour le développement, la modernisation et l'expansion des réseaux de transports et plus particulièrement ceux ferroviaires.

Grâce à une combinaison de progrès de l'électronique, des nanotechnologies, des communications sans fil et de l'informatique embarquée, il est maintenant possible de concevoir des

capteurs évolués et des systèmes de captage qui peuvent être utilisés dans différents domaines. Ces évolutions ont permis la naissance d'une nouvelle génération de réseau : les réseaux de capteurs sans fil ou Wireless Sensor Networks en anglais (WSNs) [11]. Les WSNs sont des systèmes composés d'un grand nombre de nœuds individuels capables d'interagir avec leur environnement par la détection ou le contrôle de paramètres physiques. La collaboration entre tous ces nœuds est assurée par une communication sans fil, qui apporte des multiples avantages (mobilité, déploiement, maintenance facile, etc.). Des capteurs sans fil peuvent être utilisés pour la surveillance des infrastructures ferroviaires y compris les ponts, les voies ferrées et des équipements de la voie, ainsi que la surveillance de l'intégrité structurelle des véhicules : châssis, roues et wagons.

La motivation des travaux présentés dans ce manuscrit est l'étude de la faisabilité d'une plateforme de communication pour les réseaux de capteurs sans fil, autonomes et intégrables dans l'optique d'une application réelle du contrôle-santé intégré. Plus précisément, on s'intéresse à des applications du type "ambient noise correlation", rendant possible une inspection des structures et pièces en disposant des capteurs en écoute passive uniquement, sans avoir recours à des émissions ultrasonores. Cependant, la présence de plusieurs sources acoustiques naturelles dans l'environnement ferroviaire, comme le bruit généré par le contact roue-rail et les bruits aérodynamiques s'avère être une voie plausible. Ainsi, une telle application est d'un grand intérêt du point de vue de la limitation de la consommation énergétique. Ce travail s'intéresse d'une part à la partie acoustique qui consiste à exploiter les signaux acoustiques quasi-aléatoires se propageant dans la structure pour la détection des endommagements et la définition des procédés de prétraitement nécessaires au conditionnement des signaux les rendant compatibles avec les contraintes d'une communication sans fil basse consommation. D'une autre part, au développement de la plateforme de communication sans fil, la gestion du réseau et la transmission des données vers une station de traitement.

Le présent manuscrit est composé de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, après des généralités sur le CND et plus précisément la thématique CSI, ainsi que les réseaux de capteurs sans fil et leurs applications, nous présentons les apports potentiels des WSNs pour les applications de CSI au sein des transports et en particulier, pour la surveillance-santé des structures et infrastructures ferroviaires. Nous étudierons et analyserons cette catégorie de systèmes avec leurs paramètres associés dans le but de réaliser une évaluation significative de ce type de réseau pour l'application visée.

Puis, nous présentons dans le deuxième chapitre un rappel des bases théoriques de la méthode de CSI passive, nous établirons les conditions de la reconstruction passive de la réponse active par des fonctions de corrélations estimées entre deux points de la structure dans un contexte ferroviaire. Cette approche est ensuite validée par une comparaison entre l'expérimentation d'une émission-réception active et celle de corrélation de bruit. Par la suite, nous appliquerons cette technique pour la détection d'un éventuel défaut sur un échantillon de rail ferroviaire.

Dans le chapitre trois, la modélisation de la plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures sera détaillée. Nous décrirons l'application du point de vue des besoins, des contraintes et des propositions. Les acteurs intervenants dans notre topologie seront

identifiés et leur classification en fonction des cas d'utilisation sera présentée. Ensuite, nous nous concentrerons sur les technologies potentiellement intéressantes pour notre application et une étude comparative sera présentée sur le canal sans fil avec la technologie de communication choisie afin d'analyser le comportement de la portée de notre système dans différents environnements.

Enfin, dans le quatrième chapitre le prototype-plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures sera présenté. Une solution pour la synchronisation des capteurs sans fil donnera lieu aux travaux répondant aux besoins de notre application. Par la suite, nous détaillerons les algorithmes de communication et de gestion du réseau et nous validerons le système développé avec des tests réalisés sur un rail ferroviaire.

CHAPITRE 1

Les réseaux de capteurs sans fil et leurs applications au contrôle-santé des structures et infrastructures

Sommaire

1.1 Introduction 5
1.2 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil 7
1.2.1 Mise en œuvre et déploiement des WSNs 7
1.2.2 Contraintes de conception des WSNs 9
1.2.3 Architecture matérielle d'un nœud capteur 10
1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil 17
1.4 Application au contrôle-santé des structures et infrastructures ferroviaires 21
1.4.1 État de l'art des techniques de contrôle non destructif dans l'industrie ferroviaire 21
1.4.2 WSNs - CSI : Vers des infrastructures ferroviaires intelligentes . . 26
1.4.3 Capteurs utilisés et éléments inspectés 28
1.5 Objectifs et enjeux de notre travail de recherche 31
1.5.1 Le CSI au sein de l'IEMN 31
1.5.2 Objectif des travaux présentés dans ce manuscrit 32
1.6 Conclusion 33

1.1 Introduction

Les capteurs existants actuellement facilitent les mesures des paramètres physiques tels que : la température, l'humidité, la lumière, les vibrations, etc. Cette diversité permet le développement de nombreuses applications dans différents domaines, néanmoins la conception de ces systèmes imposent, dans la plupart des cas, des exigences différentes et complexes. Aujourd'hui, un grand nombre de capteurs et actionneurs peuvent être déployés dans différents environnements. La mise en réseaux de ceux-ci et l'analyse des données qu'ils collectent

permet d'avoir une idée plus ou moins précise sur la zone sous surveillance. Toutefois, dans un grand nombre d'applications, disposer d'une interconnexion filaire pour l'ensemble des entités du réseau constitue un obstacle considérable (grand nombre de dispositifs, complexité du câblage, problème de maintenance).

Grâce à une combinaison de progrès de l'électronique, des nanotechnologies, des communications sans fil et de l'informatique embarquée, il est maintenant possible de concevoir des capteurs évolués et des systèmes de captage qui peuvent être utilisés dans différents domaines. Ces évolutions ont permis la naissance d'une nouvelle génération de réseau : les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) [11]. L'apparition de la notion de " nœud capteur " remonte aux années 1990 et est due au chercheur Kris Pister de l'Université de Berkeley, en Californie, qui avait imaginé " des particules intelligentes " capables de tout surveiller sur la planète. En 1998, le projet " SmartDust " [12, 13], dirigé par les professeurs Kahn et Pister, a pour objectif de concevoir des microsystèmes constitués de capteurs capables de communiquer des informations mesurées dans l'environnement : c'est l'avènement des nœuds capteurs communicants et des réseaux de capteurs sans fil.

Finalement, les WSNs sont des systèmes composés d'un grand nombre de nœuds individuels capables d'interagir avec leur environnement par la détection ou le contrôle de paramètres physiques. La collaboration entre tous ces nœuds est assurée par une communication sans fil, qui apporte des multiples avantages (mobilité, déploiement, maintenance facile, etc.). En contrepartie, les défis sont aussi nombreux (optimiser l'autonomie des nœuds, assurer la couverture et une connectivité fiable, améliorer la précision des données transmises, etc.). En effet, la conception d'un WSN nécessite la connaissance et la maitrise de plusieurs domaines : le support de communication radio, la détermination d'un protocole adapté et l'alimentation en énergie qui influence les caractéristiques d'un nœud.

Les WSNs constituent donc des systèmes distribués omniprésents et sont potentiellement l'une des technologies les plus importantes de ce siècle. Ils sont spécifiquement identifiés comme un bon candidat pour devenir une partie intégrante des systèmes de surveillance-santé des structures et infrastructures critiques. Un bon exemple d'infrastructure critique où les WSNs peuvent être appliqués sont les infrastructures ferroviaires. Comme tout autre type d'infrastructure, elles sont affectés par le processus de vieillissement. À titre d'exemple, aux États-Unis une grande partie des lignes de chemin de fer ont été construites à la fin du $19^{ème}$ siècle ou au début du $20^{ème}$ siècle. En Europe de grandes sections de lignes de chemin de fer ont été reconstruites après la seconde guerre mondiale. Par conséquent, il est important de réglementer les directives d'entretien et de restauration pour assurer la sécurité et la fiabilité des transports ferroviaires. En effet, une grande attention a été accordée à cette question à partir de la fin du $20^{ème}$ siècle. En Europe, les directives pour l'entretien des lignes de chemin de fer sont réglementées dans les documents 96/48/CE et 2001/16/CE. Suite à ces directives une inspection visuelle des éléments de l'infrastructure doit être effectuée tous les 15 ans par des techniciens spécialisés. Par ailleurs, une inspection visuelle générale complémentaire est effectuée chaque année par des gardes de lignes de chemins de fer. Cela peut être suffisant pour la plupart des éléments de chemin de fer, mais dans le cas des structures avec une topologie particulière : ponts, tunnels, aiguillages les informations sur l'évolution des défauts sont plus limitées. En effet, dans ces cas les inspections visuelles sont beaucoup plus difficiles

à réaliser et nécessitent une fermeture temporaire à la circulation.

Les WSNs peuvent être utilisés comme des systèmes de surveillance-santé permanents des zones critiques et ainsi réduire considérablement les coûts d'installation et de maintenance puisqu'aucun câblage n'est nécessaire. Cependant, une plateforme de réseau de capteurs permanents devrait avoir une longue durée de vie. En ce sens, il est primordiale d'analyser les caractéristiques des éléments du WSN car son comportement va déterminer la réponse de l'ensemble du système.

Ce premier chapitre sera dédié à la présentation générale des réseaux de capteurs sans fil, leurs familles et modèles, leurs composants caractéristiques, ainsi que les domaines d'application associés. Cette partie donne aussi une revue sur la conception de l'architecture de communication de ces réseaux, directement liée au type d'application. Nous donnerons un aperçu des possibilités offertes par les WSNs pour les applications de contrôle de l'intégrité des structures et infrastructures ferroviaires, des capteurs utilisés et de l'architecture de communication de tels systèmes. Ainsi, l'objectif de ce chapitre sera d'étudier et d'analyser cette catégorie de systèmes avec leurs paramètres associés, dans le but de réaliser une évaluation significative de ce type de réseau selon l'application visée.

1.2 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.2.1 Mise en œuvre et déploiement des WSNs

Les WSNs sont un cas particulier des réseaux Ad'Hoc (appelés aussi réseaux mobiles Ad'Hoc " Mobile Ad'hoc NETworks " MANET). Contrairement aux réseaux de communication cellulaires, dans les WSNs aucune administration centralisée, ni aucune infrastructure ne sont nécessaires [11]. Dans un WSN, les nœuds forment eux-mêmes, d'une manière Ad'Hoc, une infrastructure de réseau où ils jouent les deux rôles de nœuds sources et relais (routeur).

Les principales différences entre les WSNs et les MANETs se situent au niveau de la densité et de la tolérance à l'efficacité énergétique. En effet, la taille d'un WSN est supposée être de l'ordre de plusieurs centaines à des milliers de nœuds [11].

Un WSN est constitué par un ensemble de nœuds miniatures, chacun composé de quatre entités de base :

1. un module radio pour l'échange des informations via un lien sans fil ;
2. un ou plusieurs capteurs/actionneurs avec une tâche spécifique, telle que la détection de mouvement pour un capteur et l'activation d'un contact pour un actionneur ;
3. un microcontrôleur pour le traitement des données ;
4. une source d'énergie pour alimenter l'ensemble.

Selon les applications visées, un nœud peut contenir d'autres entités telles : un système de localisation (GPS), ou un système de récupération d'énergie. Les WSNs ont conquis divers

domaines couvrant des applications militaires tel que le tracking, le suivi des animaux, la surveillance de l'habitat, les applications industrielles et des applications liées à la santé [11]. Cette technologie doit offrir des solutions flexibles, capables d'économiser de l'énergie et auto-configurables. Ces caractéristiques la rendent plus attractives par rapports aux réseaux câblés où ces concepts ne sont pas applicables.

La FIGURE 1.1 présente un exemple d'architecture de réseau de capteurs sans fil. Dans un WSN, les données prélevées par les capteurs sont acheminés directement ou par l'intermédiaire d'autres nœuds à un point de collecte appelé sink ou station de collecte. Ce réseau peut communiquer avec d'autres types de réseaux afin d'acheminer les données capturées vers un centre de contrôle distant pour le traitement. Selon l'application, le réseau intermédiaire entre la zone de déploiement du WSN et le centre de contrôle peut être du type GSM, sans fil ou filaire (internet).

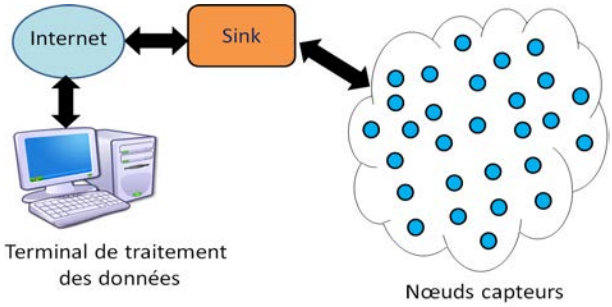


FIGURE 1.1 – Exemple d'architecture de réseau de capteurs sans fil.

La mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil est une tâche difficile étant donné l'environnement et les contraintes spécifiques de chaque application. Dans ce sens, une première action consiste à étudier l'environnement de déploiement et choisir le type de capteur en fonction de ses caractéristiques physiques et techniques. Dans la plupart des applications, les ressources en énergie sont limitées, ce qui a un impact direct sur la façon de concevoir le système de communication (privilégier des technologies de transmission radio basse consommation).

L'architecture du réseau est un autre aspect important dans la mise en œuvre de ce dernier, qui est choisie en fonction du contexte : topologie Ad'Hoc sans infrastructure ou cellulaire avec infrastructure. Ce type d'architecture est caractérisé par une phase d'initialisation, pour permettre aux nœuds du réseau de découvrir leurs voisins. Ainsi, ils pourront interagir avec l'environnement physique, répondre à des interrogations à distance et transmettre les données récoltées. Par ailleurs, le coût de la mise en œuvre doit rester compatible avec l'application. Le coût du matériel et sa résistance aux conditions de fonctionnement (humidité, variations des températures, etc.), la simplicité et la flexibilité sont aussi impliquées.

Il existe des architectures réseau dans lesquelles les capteurs peuvent être déployés d'une manière déterministe et dans certaines applications le déploiement est aléatoire (à titre d'exemple : les nœuds capteurs déployés depuis un avion [14]). De nouveaux nœuds peuvent être intégrés au fur et à mesure dans l'environnement de déploiement pendant la durée de

vie du réseau de capteurs. Le processus de déploiement diffère en fonction de la mobilité des capteurs : des nœuds peuvent être fixés à des objets, véhicules, par exemple dans les applications de logistique ou de surveillance-santé.

Dans la plupart des cas, les nœuds capteurs sont déployés dans des environnements difficiles, ainsi la question de la maintenance des capteurs se pose. Étroitement liée à la maintenance, l'approvisionnement en énergie peut être un problème. En effet, la limitation de la consommation d'énergie des nœuds capteurs joue un rôle primordiale dans le prolongement de la durée de vie des capteurs et devient un critère de performance prédominant.

1.2.2 Contraintes de conception des WSNs

Les solutions envisagées pour répondre aux exigences de l'application visée sont conditionnées par des contraintes. Ces solutions peuvent donc être plus ou moins efficaces selon l'application. En d'autres termes, l'application ou le type d'application reste donc l'élément le plus influent pour la conception des protocoles du réseau. Toutefois, certaines exigences lors de la conception d'un WSN sont communes à plusieurs applications. Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des WSNs peuvent être résumés comme suit :

- **Durée de vie :** c'est la caractéristique fondamentale d'un WSN. Les contraintes liées à l'approvisionnement en énergie (changement ou rechargement des batteries) peuvent être pénibles selon le déploiement des nœuds, et soulèvent un coût de maintenance élevé. Il est donc essentiel d'avoir une durée de vie du réseau la plus longue possible.
- **Échelle :** la plupart des WSNs sont composés de quelques dizaines (voir centaines) de dispositifs, mais dans certaines applications des milliers de nœuds sont exigés.
- **Coût :** comme les WSNs peuvent contenir un nombre important de nœuds, il est nécessaire d'avoir un coût unitaire par nœud le plus faible possible, afin d'arriver à un coût globale du réseau acceptable.
- **Tolérance aux erreurs (scalabilité) :** certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique (nœud endommagé) ou une interférence. Ces problèmes ne devraient pas affecter le reste du réseau. Ce dernier doit être capable de prendre en considération cette modification tout en assurant une bonne qualité de service.
- **Environnement :** les nœuds capteurs sont souvent déployés dans des endroits hostiles : champs de bataille, à l'intérieur des grandes machines, au fond des océans ou dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés. Ces nœuds doivent fonctionner sans surveillance.

En respectant ces contraintes de conception, un réseau de capteurs sans fil est caractérisé par :

- **Basse consommation :** une longue durée de vie pour un WSN est une exigence critique dans la plupart des applications. En conséquence, pour atteindre cette autonomie,

il est primordiale de minimiser la consommation moyenne des nœuds. Une des pistes explorées par la communauté scientifique actuellement est d'extraire l'énergie de l'environnement (lumière, vibration mécaniques, bruit acoustique [15, 16, 17]). Ces nouvelles techniques peuvent grandement améliorer la durée de vie, néanmoins l'énergie produite par ces techniques reste très faible. Par conséquent, une basse consommation d'énergie des nœuds reste une caractéristique de la plus haute importance.

- **Réduction de la complexité matérielle et logicielle :** comme nous l'avons déjà vu, un bon nombre de défis des WSNs tournent autour des ressources énergétiques limitées. La taille des nœuds limite la taille des batteries. En effet, la conception de logiciels et de matériels nécessite une attention considérable pour une utilisation efficace de l'énergie. Les fonctionnalités mises en œuvre par la partie matérielle se doivent d'être aussi simple que possible, car la complexité conduit à une augmentation de la consommation d'énergie. Par exemple, la compression des données pourrait réduire la quantité d'énergie nécessaire pour la transmission radio. La gestion énergétique dépend aussi de la demande ; dans certaines applications, il peut être acceptable d'éteindre ou de mettre en état de veille un ensemble de nœuds afin de conserver l'énergie alors que d'autres applications exigent que tous les nœuds fonctionnent simultanément.
- **Auto-configuration :** un WSN doit pouvoir configurer tous ses paramètres indépendamment de son environnement d'installation. Selon le nombre de nœud et leur déploiement, il est nécessaire que le réseau soit capable d'identifier les positions des nœuds, localiser et tolérer d'éventuelles pannes (exemple : problème de batterie), ou encore intégrer de nouveaux nœuds au réseau.

A travers les contraintes et caractéristiques citées précédemment, il apparait clairement que le défi majeur dans la conception d'un WSN concerne son autonomie et sa durée de vie. Pour répondre à cette problématique, il est important d'implémenter des mécanismes et des techniques visant à minimiser la consommation d'énergie, en particulier en adoptant des protocoles de communication radio adéquats à l'application. De plus, la durée entre deux mesures d'un capteur peut être importante (exemple : de l'ordre de la minute). Dans ce cas, l'utilisation des mécanismes de mise en veille est pertinente pour éteindre le capteur entre deux mesures et pendant les périodes d'inactivités. Enfin, il est important que tous les efforts de réduction de la consommation d'énergie maintiennent un niveau de qualité de service acceptable pour les communications radio. L'efficacité énergétique d'un WSN dépend alors de plusieurs paramètres situés à plusieurs niveaux dans l'architecture du réseau et de chaque nœud. Dans le paragraphe suivant, nous détaillerons les éléments constituant un nœud capteur et leurs rôles.

1.2.3 Architecture matérielle d'un nœud capteur

Dans cette section, nous nous concentrons sur la définition d'un nœud capteur, les éléments physiques le composant et les caractéristiques des différents nœuds disponibles sur le marché.

Le nœud capteur est l'unité de base d'un réseau de capteurs sans fil. Il rassemble les

opérations de détection, traitement, communication et alimentation. Il stocke et exécute les protocoles de communication et des algorithmes de traitement des informations. Ainsi, il est chargé de recueillir des informations sur un phénomène ou un processus physique, dans l'environnement de déploiement, les traduire en signaux pouvant être mesurés et analysés, puis les transmettre vers un point de collecte. La qualité, la taille et la fréquence des données prélevées dépendent des ressources physiques du nœud. En effet, la conception et la mise en œuvre d'un nœud capteur sans fil sont des étapes cruciales. Comme décrit précédemment, un nœud capteur est constitué essentiellement d'un sous-système de captage (sous-système d'acquisition), une unité de traitement, unité de communication et un sous-système d'alimentation. La FIGURE 1.2 illustre l'anatomie typique d'un nœud capteur sans fil.

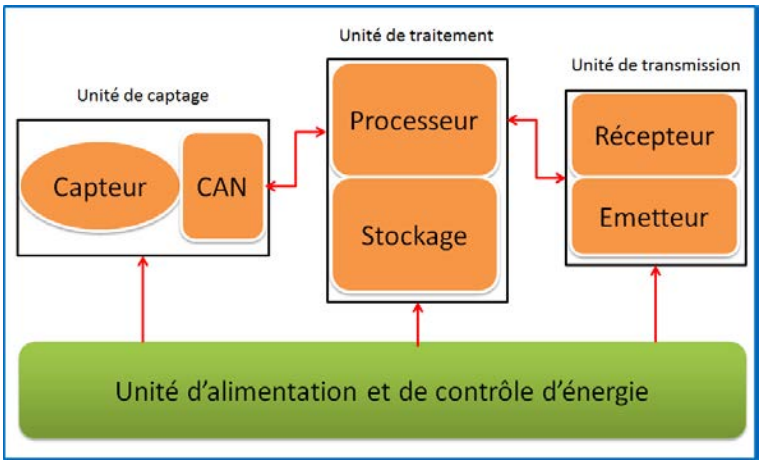


FIGURE 1.2 – Anatomie typique d'un nœud capteur sans fil.

Depuis que le concept de SmartDust a été proposé il y a une dizaine d'années [12], de nombreux laboratoires et entreprises ont proposé une multitudes de prototypes et modèles de nœuds capteurs. Différents nœuds ont été développés et commercialisés. Nous présentons dans le tableau. 1.1 un aperçu de plusieurs nœuds du commerce qui trace l'évolution de cette technologie durant cette dernière décennie.

a) Sous-système d'acquisition

L'unité d'acquisition comprend un ou plusieurs capteurs, un ou plusieurs convertisseurs analogiques numériques (ADC) ainsi qu'un mécanisme de multiplexage. Il existe actuellement une multitude de capteurs qui permettent de mesurer et de quantifier des caractéristiques physiques, à des prix relativement faibles. Un capteur contient un transducteur : dispositif qui permet de convertir une forme d'énergie en une autre. Un grand nombre de capteurs utilisés dans plusieurs domaines fournissent une énergie électrique (tension). Cette tension est un signal analogique ayant une amplitude et une fréquence. Cependant, un ADC est nécessaire pour interfacer le capteur avec un processeur numérique en convertissant la sortie du capteur, qui est généralement un signal analogique, en un signal numérique.

Conceptuellement, la conversion analogique-numérique peut être divisée en trois étapes : l'échantillonnage temporel, la quantification et le codage. La FIGURE 1.3 présente succes-

TABLE 1.1 – Exemples des nœuds existants sur le marché.

Nœud	**Micro-contrôleur**	**Émetteur/ Récepteur**	**Mémoire**	**Vendeur**	**Année**
Mica	Atmel ATmega103	RFM TR1000 radio	512 KB	Crossbow	2001
Mica2	Atmel ATmega128L	Chipcon CC1000	512 KB	Crossbow	2002
MicaZ	Atmel ATmega128L	TI CC2420 802.15.4 Radio	512 KB	Crossbow	2002
TelosB	TI MSP430	TI CC2420 802.15.4 Radio	1024 KB	Crossbow	2004
Sun SPOT	Atmel AT91RM920T	TI CC2420 802.15.4 Radio	N/A	Oracle	2006
EPIC	TI MSP430	TI CC2420 802.15.4 Radio	20 MB	UC Berkeley	2007
IRIS	Atmel ATmega1281	Atmel AT86RF23 Radio	512 KB	Crossbow	2007
Cricket	Atmel ATmega128L	Chipcon CC1000	512 KB	MEMSIC	2007
Imote2	Intel PXA271 XScale	TI CC2420 802.15.4 Radio	32 MB	Crossbow	2008
Waspmote	Atmel ATmega1281	ZigBee/ 802.15.4/ DigiMesh/ RF, 2.4 GHz/ 868/ 900 MHz	2 GB	Libelium	2009
LOTUS	Cortex M3 10-100 MHz	RF231 Radio	64 MB	MEMSIC	2011

sivement ces trois étapes pour un ADC dont la sortie du signal numérique est sur 3 bits :

1. Échantillonnage, quantification : Le signal fournie par le capteur, qui est un signal analogique, $v_a(t)$ continu en temps et en amplitude (i) est échantillonné à une période d'échantillonnage constante T_{ech}. Ce signal échantillonné $v_{ech}(kT_{ech})$ est discret en temps et continu en amplitude (ii), est ensuite quantifié et devient un signal numérique $v_q[k]$ discret en temps et en amplitude (iii).

   L'obtention d'un signal échantillonné $x_{ech}(kT_{ech})$ à partir d'un signal analogique x(t) peut être modélisé mathématiquement dans le domaine temporel par la multiplication

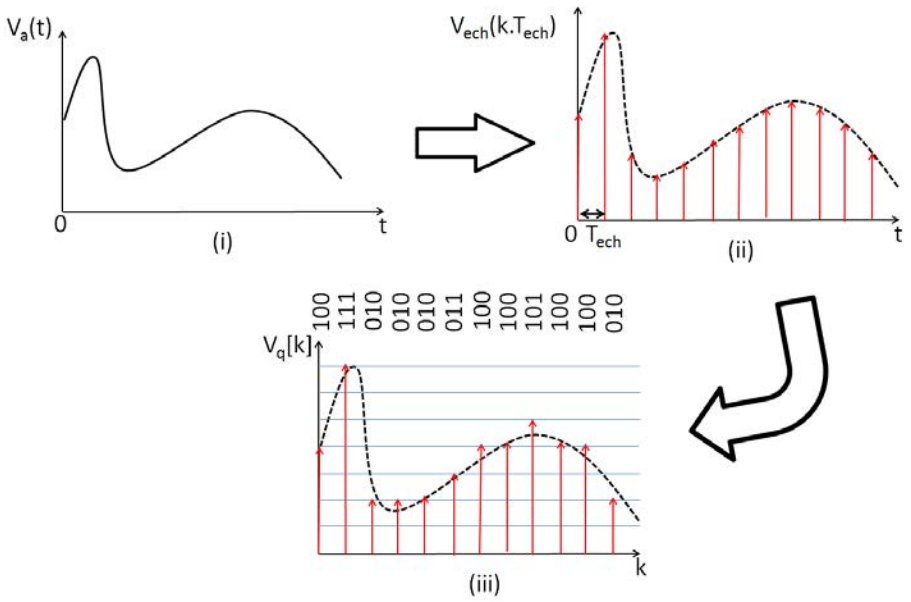


FIGURE 1.3 – Processus de conversion Analogique-Numérique. (i) signal analogique, (ii) signal échantillonné, (iii) signal quantifié.

de x(t) par un peigne de Dirac de période T_{ech} noté $\delta_{T_{ech}}(t)$ dans l'équation (1.1) :

$$x_{ech}(kT_{ech}) = x(t)\delta_{T_{ech}}(t) \tag{1.1}$$

2. Fréquence d'échantillonnage, repliement : Nous avons vu plus haut que l'échantillonnage d'un signal analogique est une représentation sous une forme discrète, par une liste de valeurs prélevées régulièrement dans ce signal. Nous avons vu qu'il fallait échantillonner avec une fréquence d'échantillonnage : $f_{ech} = \frac{1}{T_{ech}}$. Puis, il faut se fixer un format binaire de n bits pour exprimer chaque échantillon (quantification à 2^n valeurs). Si une fréquence d'échantillonnage adéquate f_{ech} est utilisée pour l'acquisition des données, le signal échantillonné serait une représentation fidèle du signal continu sans perte d'information. La forme d'onde d'origine peut être facilement reconstituée par interpolation des valeurs échantillonnées. Plus f_{ech} est élevée, plus la forme d'onde échantillonnée est fidèle au signal d'origine. Inversement, si f_{ech} est faible, la forme d'onde échantillonnée ne représentera pas le signal d'origine. La forme d'onde résultant du sous-échantillonnage est appelée " repliement " [18]. En effet, un problème survient lors de la reconstitution du signal analogique à partir du signal numérique. Il existe une contrainte sur la fréquence d'échantillonnage. Celle-ci doit être au moins égale au double de la fréquence maximale f_{max} du signal analogique, c'est le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon (formule (1.2)).

$$f_{ech} \geq 2 \times f_{max} \tag{1.2}$$

La FIGURE 1.4 représente l'échantillonnage d'un signal d'origine de fréquence $f = 0.5\ Hz$ avec deux fréquences différentes : la première respectant le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon (1.2) qui permet de représenter fidèlement le signal

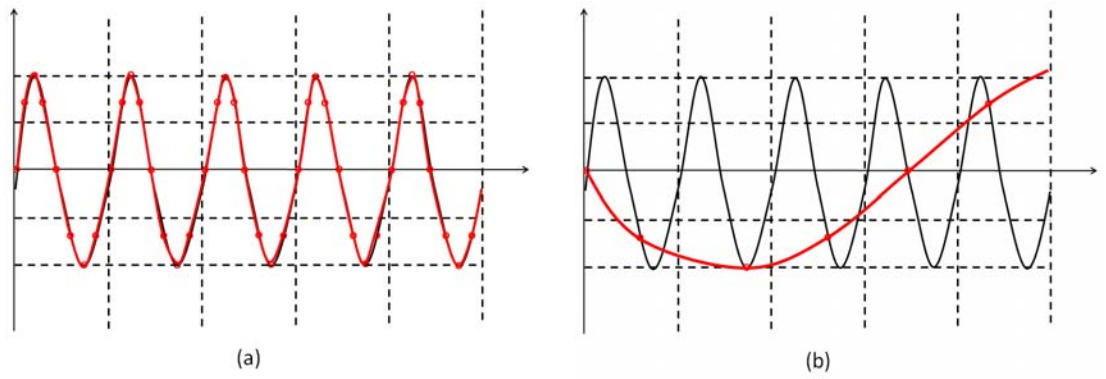


FIGURE 1.4 – Signal d'origine de fréquence $f = 0.5Hz$, acquis avec différentes fréquences d'échantillonnage : (a) fréquence d'échantillonnage adéquate $f_{ech} = 4Hz$, (b) fréquence d'échantillonnage insuffisante, $f_{ech} = 0.66Hz$, ce qui conduit au problème de repliement.

d'origine. La deuxième $f_e = 0.66Hz$ qui ne respecte pas le théorème d'échantillonnage ce qui conduit au phénomène de repliement.

b) Unité de traitement

Avec les contraintes de conception présentées précédemment (1.2.2), les unités de traitement utilisées dans ce domaine sont peux coûteuses et à basse consommation. Celle-ci effectue un traitement de données et le contrôle des fonctionnalités des autres composants dans le nœud capteur. Ainsi, son rôle principal est d'exécuter (traiter) des instructions relatives à la configuration, la détection, la collecte, la communication et l'auto-organisation. Ce sous-système comprend une puce processeur, une mémoire non volatile pour le stockage des instructions de programme, une mémoire active pour stocker temporairement les données prélevées par les capteurs, une horloge interne et des périphériques supplémentaires (entrées-sorties analogiques et numériques). Ce sous-système permet l'interfaçage entre l'unité de captage et le sous-système de transmission.

Le tableau. 1.2 donne une revue des microcontrôleurs pour chaque modèle mentionné dans le tableau précédent (1.1). La vitesse du microcontrôleur est étroitement liée à la taille du bus de communication, l'horloge, RAM, EEPROM et sa mémoire flash. La plupart des nœuds sont équipés d'un microcontrôleur constitué d'un bus 8 bits, une horloge 8 MHz, une mémoire contenant 4KB de RAM, 4 KB d'EEPROM et 128 KB de mémoire flash. Ces ressources limitées sont suffisantes pour accomplir des tâches ordinaires. Toutefois, plus de ressources sont nécessaires dans certains cas d'application.

La plupart des microcontrôleurs qui fonctionnent sur une seule fréquence, ne supportent pas la mise à l'échelle dynamique de la tension (DVS : dynamic voltage scaling). Comme le réglage de la fréquence du processeur est une des méthodes les plus efficaces de l'optimisation de la consommation d'énergie, des microcontrôleurs fonctionnant sur des fréquences multiples CPU sont développés. Par exemple, le processeur Intel PXA271 XScale supporte la commutation entre les quatre fréquences de processeur 13, 104, 208, et 416 MHz pour

équilibrer les performances et l'efficacité énergétiques.

TABLE 1.2 – Comparaison des différents microcontrôleurs utilisés par les constructeurs des nœuds capteurs.

Famille de microcontrôleur	**Bus**	**Horloge(MHz)**	**RAM**	**EEPROM**	**Mémoire flash**
ATmega103	8-bit	4	4 KB	4 KB	128 KB
Atmega128L	8-bit	8	4 KB	512 KB	128 KB
TI MSP430 microcontrôleur	16-bit	4-8	10 KB	N/A	48 KB
ATmega1281	8-bit	8	8 KB	4 KB	128 KB
Atmel AT91RM9200	32-bit	180	512 KB	N/A	4 MB
Cortex M3	32-bit	10-100	64 KB SRAM	N/A	512 KB + 64 MB
Intel PXA271 XScale	16/32-bit	13-416	32 MB	N/A	32 MB

c) Sous-système de transmission

Le sous-système de transmission est chargé d'effectuer tous les transferts (émissions-réceptions) d'informations via un support de communication sans fil. Dans les WSNs le sous-système de transmission est le plus gourmand en énergie. Autrement dit, disposer de circuits émetteurs/récepteurs et des protocoles de communication à faible coût et basse consommation est nécessaire. Dans ce contexte, le choix du module de communication radio et du type de processeur est vital pour les performances, ainsi que la consommation d'énergie d'un nœud capteur sans fil. De plus, la manière dont les dispositifs d'un nœud sont inter-connectés avec le sous-système de traitement est également importante. Un transfert rapide et économe en énergie entre les sous-systèmes d'un nœud capteurs est fondamental pour l'efficacité du réseau de capteurs sans fil global. Des interfaces séries telles que SPI (Serial Peripheral Interface), GPIO (General Purpose Intut/Output), SDIO (Secure Data Input/Output), I^2C (Inter-Integrated Circuit) et USB (Universal Serial Bus) sont utilisées. Les propriétés des modules émetteur/récepteur des nœuds commerciaux présentés précédemment sont résumés dans le tableau. 1.3. La plupart de ces nœuds sont équipés d'un module émetteur/récepteur compatible IEEE.802.15.4 avec des caractéristiques légèrement différentes sur la bande de fréquence et la portée en Outdoor. Une caractéristique importante de ces modules concerne la prise en compte d'un nombre différent d'états d'alimentation et chacun de ces états présente une consommation d'énergie différente.

TABLE 1.3 – Comparaison des modules radio.

Modèle de radio	**Bande de fréquence (MHz)**	**Portée(Outdoor)**	**Consommation**
CC1000	300-1000	500-1000 ft	Tx : 7.4 mA, Rx : 10.4 mA, Idle : 74 μA, Sleep : 0.2 μA
CC2420	2400-2483	75-100 m	Tx : 11-17.4mA, Rx : 19.7 mA, Idle : 20 μA, Sleep : 1 μA
CC2480	2405-2480	>300 m	Tx : 27 mA, Rx : 27 mA, Sleep : 0.3-190 μA
Atmel AT86RF230	2400-2483.5	100 m	Tx : 16.5 mA, Rx : 15.5 mA, Sleep : 20 μA

d) Sous-système d'alimentation

Tout nœud capteur est muni d'une ressource d'énergie à durée limitée (allant de quelques mois à quelques années), à cause de la non disponibilité d'un approvisionnement en énergie continue dans la zone de déploiement, des difficultés et coûts élevés d'interventions pour changer ou recharger les batteries des capteurs. En effet, l'énergie est une ressource précieuse dans les WSNs et l'efficacité énergétique doit être un objectif évident d'optimisation [19]. La gestion de l'énergie est un point crucial dans les WSNs. Ainsi, l'unité de contrôle d'énergie est le composant le plus important du nœud capteur. Son rôle est de répartir l'énergie entre les divers modules et également de réduire la consommation d'énergie en agissant sur les modules inactifs. Selon son niveau de batterie, un nœud peut participer ou pas au routage des données.

L'environnement ambiant d'un système de capteurs est une source d'énergie permanente et renouvelable. Cette disponibilité est un argument majeur pour le développement de systèmes capables d'extraire cette ressource, qu'elle soit solaire, thermique ou mécanique et d'alimenter les capteurs communicants, en leur offrant une source d'énergie inépuisable. La récupération d'énergie est une thématique de recherche à part entière et de nouveaux systèmes de récupération d'énergie ont été développés pour alimenter de petits systèmes comme les nœuds capteurs sans fil [20]. Ainsi, dès les premiers systèmes de capteurs communicants, des éléments de récupération sont intégrés pour apporter de l'énergie et augmenter la durée de vie du système [13]. Bien que les premiers systèmes de capteurs soient des réalisations de laboratoire, le monde industriel s'est très rapidement illustré avec des réalisations de systèmes fonctionnels basés sur la récupération d'énergie [21]. Lorsqu'on considère l'utilisation simple d'une batterie, la quantité d'énergie disponible est finie alors que la puissance disponible est théoriquement infinie. Toutefois, avec la récupération d'énergie dans l'environnement, le stock d'énergie disponible est infini, mais la puissance est cette fois limitée. Afin de pouvoir utiliser cette énergie même si la puissance extraite est inférieure à la puissance en fonctionnement, il est nécessaire de stocker l'énergie localement dans le nœud. Les systèmes de capteurs sont

ainsi constitués d'éléments de stockage et de gestion d'énergie.

1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Selon les applications visées, les WSNs peuvent être déployés sur terre, sous terre et sous l'eau. Les WSNs sont confrontés à différents défis et contraintes reliées à l'environnement de déploiement. Dans cette section, nous introduisons les différentes familles de réseaux de capteurs sans fil et nous donnons un aperçu des différents domaines d'applications de tels réseau et leur apport.

Il existe six familles de réseaux de capteurs sans fil : les réseaux de capteurs terrestres sans fil (Wireless Terrestrial Sensor Networks : WTSNs), les réseaux de capteurs souterrains sans fil (Wireless Underground Sensor Networks : WUSN), les réseaux de capteurs sous-marins sans fil (Wireless Underwater Sensor Networks : WUwSNs), les réseaux de capteurs corporels sans fil (Wireless Body Sensor Networks : WBSNs), les réseaux de capteurs mobiles sans fil (Wireless Mobile Sensor Networks : WMSNs) et les réseaux de capteurs multimédia sans fil (Wireless Multimedia Sensor Networks : WMuSNs). La FIGURE 1.5 représente une vue d'ensemble de ces différents types.

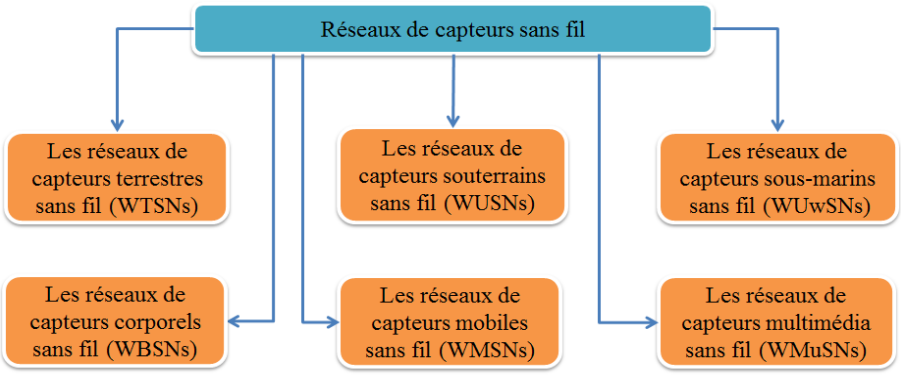


FIGURE 1.5 – Typologie des réseaux de capteurs sans fil.

Les WSNs ont conquis de nombreux domaines d'application et sont présent dans notre environnement. Cette engouement peut être compris et expliqué en rappelant ce que ces systèmes sont essentiellement : un grand nombre de petits nœuds à bas coût, auto-alimentés qui collectent des informations ou détectent des événements spéciaux, communiquent via des liens sans fil, avec un objectif final d'acheminer les informations à une unité de calcul et de traitement. La détection, le traitement et la communication sont les trois éléments clés dont la combinaison dans un petit dispositif donne lieu à un grand nombre d'applications [11].

Les applications des WSNs peuvent être classées en deux catégories [22] : la surveillance (monitoring) et le suivi (treacking) (FIGURE 1.6). Les applications de surveillance concernent la surveillance de l'environnement indoor/outdoor, surveillance des patients et de leur bien-

être, contrôle de l'alimentation, localisation et surveillance des stocks, automatisation des processus industriels et surveillance des usines, surveillance sismique et structurelle. Les applications de suivi comprennent le suivi d'objets, des animaux, des humains et des véhicules.

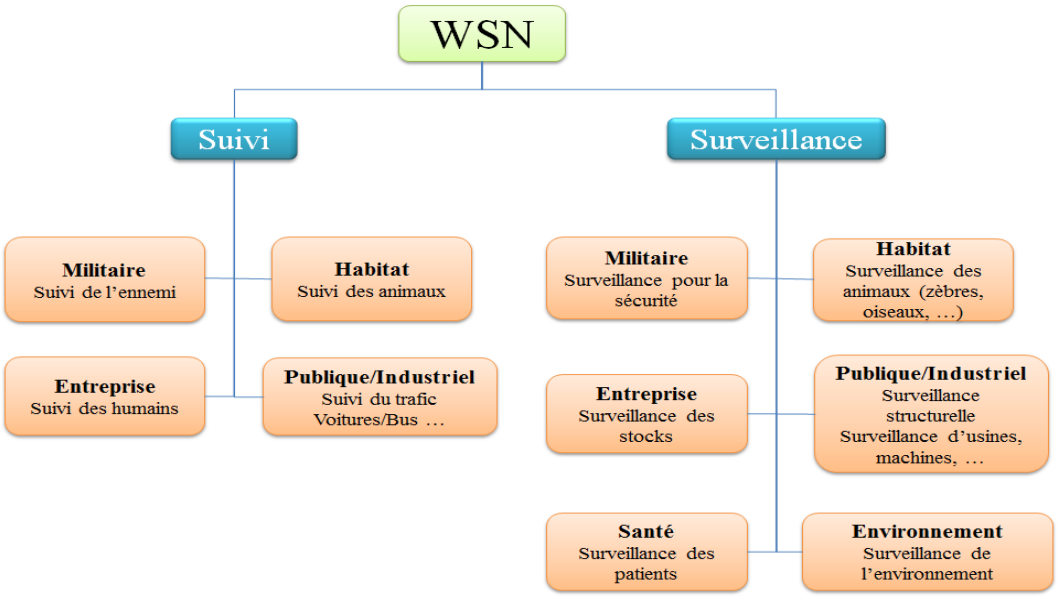


FIGURE 1.6 – Classification des applications des WSN.

Bien que ces applications soient nombreuses et différentes, nous citons ici quelques unes. Le domaine militaire, la surveillance de l'environnement, la médecine, l'agriculture et la sécurité sont que quelques exemples [23].

Un des premiers domaines d'application des WSNs a été le domaine militaire. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Ainsi, les WSNs sont devenus une partie intégrante du commandement militaire, du contrôle, de la communication et des systèmes de renseignement (**C4ISRT** : Command, Control, Communications, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting) [24, 25]. Les WSNs jouent un grand rôle dans les systèmes militaires en rendant les guerres "intelligents" avec, en particulier, moins d'implication humaine. Ces réseaux de capteurs peuvent être déployés pour :

- La surveillance des champs de batailles et des secteurs stratégiques : un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations).
- La protection des sites sensibles : étant équipés de capteurs appropriés, ces réseaux peuvent être installés à proximité d'objets et sites sensibles tels que : les centrales nucléaires, les ponts stratégiques, les pipelines de pétrole et de gaz, pour les surveiller et les protéger.

– Le guidage intelligent : des capteurs peuvent être montés sur des robots véhicules sans pilote, chars, avions de combat, drones, sous-marins, missiles afin de les guider à travers les obstacles vers leurs objectifs et de les amener à coordonner les uns avec les autres pour accomplir des attaques/défenses plus efficaces.

PinPtr [26] est un exemple d'application déployée et testée dans un environnement réel. C'est un système dit : "contre-sniper" développé pour détecter et localiser les tireurs. Ce système utilise un déploiement dense de capteurs pour détecter et mesurer le temps entre la détonation et l'arrivée des ondes de choc d'un tir. Les capteurs acheminent leurs mesures à une station de base (un ordinateur portable ou PDA) pour calculer l'emplacement du tireur.

Le système PinPtr est basé sur des nœuds MICA2-motes. Chaque nœuds est relié à une cartes multi-usages contenant un capteur acoustique. Chaque carte est conçue avec trois voies acoustiques. Les nœuds MICA2-motes fonctionnent avec un système d'exploitation TinyOS [27]. Cette plateforme gère l'ordonnancement des tâches, la communication radio, le traitement des Entrées/Sorties, etc.

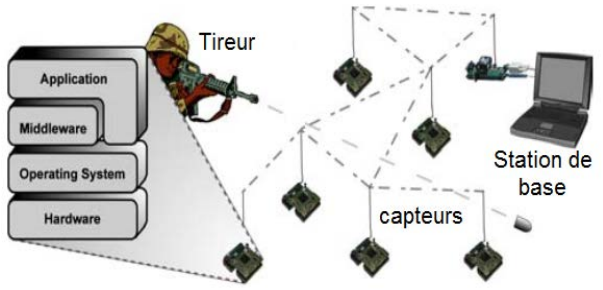


FIGURE 1.7 – Architecture du système PinPtr

Un autre domaine où les WSNs sont très utilisés est la surveillance de l'environnement. Dans ce domaine, une multitude de capteurs sont utilisés pour mesurer, surveiller et suivre une variété de paramètres ou des conditions environnementales. L'agriculture, la surveillance des bâtiments, la surveillance des volcans sont quelques exemples d'applications liées à l'environnement. Parmi les applications de surveillance de l'environnement, il y a aussi la surveillance de l'activité des volcans. Un réseau de capteurs sans fil a été développé et déployé en Juillet 2004 au volcan Tungurahua [28], un volcan actif situé dans le centre de l'Équateur (voir FIGURE 1.8).

Dans le domaine médicale, les systèmes basés sur la technologie des WSNs ont révolutionné les applications de soins, de la santé et du suivie des personnes âgées. Grâce à cette technologie les paramètres physiologiques des patients peuvent être suivis à distance par des médecins sans affecter les activités des patients. Cette avancée technologique a permis une réduction des coûts, amélioration des équipements de gestion des patients et a considérablement minimisé les erreurs humaines [29].

– Surveillance des comportements d'un patient : des capteurs déployés dans le domicile d'un patient peuvent surveiller son comportement. Par exemple, ils peuvent alerter les

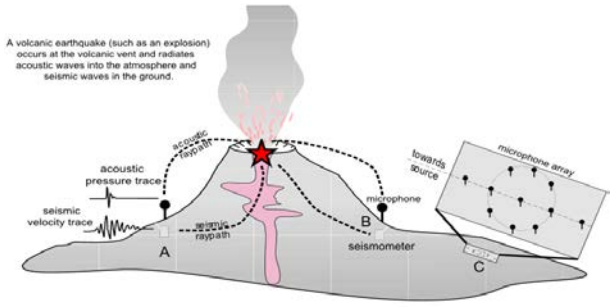


FIGURE 1.8 – WSNs pour la surveillance et le suivi de l'activité des volcans

médecins quand le patient tombe et nécessite une attention médicale immédiate.
- Suivi médical : les capteurs portables peuvent être intégrés dans un réseau du corps sans fil (WBAN [1]) pour surveiller les signes vitaux, les paramètres environnementaux et les emplacements géographiques et permettent ainsi un suivi à long terme, non invasif et ambulatoire des patients ou des personnes âgées avec des alertes instantanées aux soins en cas d'urgence. Ils permettent aussi la réception des rapports immédiats aux patients concernant leur état de santé actuel et la mise à jour des dossiers médicaux des usagers [30]. Un système de ce type, basé sur des capteurs biomédicaux sans fil est proposé dans la référence [31]. Le signal biophysique de personnes âgées est détecté et transmis par radio à une station de base de suivi de soins. Ce système utilise un microcontrôleur "MSP430" et le système d'exploitation "TinyOS". La communication radio entre les nœuds et la station de base est basée sur la norme IEEE 802.15.4/Zigbee. La référence [32] décrit un prototype de WSN pour la surveillance de la santé des patients. Ce système utilise des nœuds compatibles IEEE 802.15.4 et des capteurs de mouvement et de mesure de l'activité cardiaque.

Une multitude d'applications basées sur les WSNs ont été développées et sont disponible sur le marché. À titre d'exemples : les applications de parking intelligents, suivi des véhicules, détection d'événement, etc.

- Parking intelligent : les WSNs ont suscité un intérêt accru et sont en plein essor. Ils sont largement utilisés pour fournir une solution efficace et rentable pour les problèmes de stationnement et pour une utilisation optimale des aires de stationnement. Les WSNs permettent un suivi efficace des véhicules. Un Système de gestion de parking intelligent (SPARK : Smart Parking) basé sur la technologie des WSNs qui fournit des fonctionnalités avancées telles que la surveillance de stationnement à distance, orientation automatique et un mécanisme de réservation de parking est proposé dans [33].
- Télématique des véhicules : un aperçu détaillé de la télématique des véhicules via des WSN hétérogènes est décrit dans la référence [34]. Dans cette référence, les auteurs ont décrit une architecture nommée **AHVN** Advanced Heterogeneous Vehicular Network, qui utilise de multiple technologies radio et des techniques d'accès multiples.
- Les WSNs intra-véhicule : le remplacement des capteurs câblés et leurs câbles par des capteurs sans fil permet une réduction du poids des véhicules et ainsi baisser

1. Wireless Body Area Network

leur consommation d'énergie. Dans [35], une option pour implémenter un WSN intra-véhicule est expérimentée, il s'agit de l'utilisation de la technologie ZigBee. Cependant, la vulnérabilité inhérente de la plate-forme sans fil rend les problèmes de sécurité d'un tel remplacement très discutable. Les problèmes de sécurité des WSNs intra-véhicule ont été illustrés dans [36].

– Détection d'événement : la détection d'événement et le traking sont des applications intéressantes des WSNs. Une application de ce type est exposée dans [37]. Dans ce document, un protocole entièrement distribué, appelé **CollECT**, pour la détection d'événement et le suivi dans les réseaux de capteurs hétérogènes sans fil (WHSNs : Wireless Heterogeneous Sensor Networks), qui consiste en plusieurs types de nœuds capteurs avec différentes unités de détection.

1.4 Application au contrôle-santé des structures et infrastructures ferroviaires

Nous avons vu dans la section précédente que les WSNs sont utilisés dans de nombreux domaines d'application. Nous avons souligné que cette large gamme d'application est dûe aux multiples avantages qu'ils présentent. D'une part la suppression des encombrements et des coûts des câbles en les remplaçant par un support de communication sans fil, d'autre part la disponibilité d'un grand nombre de micro-capteurs, microcontrôleurs ainsi que le développement des tecnologies de communication et des réseaux.

Dans cette section, nous nous intéressons aux applications dans le domaine du contrôle-santé structurel. Plus particulièrement, aux techniques de contrôle utilisées dans le l'industrie ferroviaire et nous soulignons l'apport des WSNs dans ce domaine ainsi que les tendances actuelles vers des structures et infrastructures intelligentes et des systèmes mobiles ou embarqués dans des véhicules.

1.4.1 État de l'art des techniques de contrôle non destructif dans l'industrie ferroviaire

a) Le Contrôle Non Destructif CND

Le Contrôle Non Destructif (CND) ou NDT : Non-Destructive Testing en anglais, est un ensemble de méthodes permettant de définir l'état d'intégrité d'une structure mécanique sans la dégrader (comme son nom l'indique), soit en cours de production (défauts liés à la fabrication) ou pendant son utilisation (défauts liés à l'utilisation). Le CND permet de détecter des endommagements, estimer leurs tailles, sans détruire la structure. On parle aussi d'essais, évaluations ou examens non destructifs (END). Le CND est un outil très efficace pour les contrôles de qualité, car il permet de rechercher la présence de défauts dans les matériaux, pièces et de déterminer leurs caractéristiques : position, dimension, gravité, etc.

Le CND a conquis plusieurs domaines d'applications, il est très utilisé dans l'industrie automobile, pétrolière (pipelines, réservoirs), l'industrie navale (coques), l'aéronautique (poutres, ailes d'avions, pièces moteurs), l'aérospatiale et militaire ainsi que l'industrie énergétique (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.), le ferroviaire en fabrication et en maintenance (essieux, roues, rails, ballast, traverses), etc.

b) Les techniques de CND utilisées dans le domaine ferroviaire

Dans le domaine du transport et notamment celui du ferroviaire, des techniciens de maintenance marchent le long des voies pour détecter d'éventuels défauts, composants manquants ou pièces oubliées sur la voie. Des systèmes de vidéo-surveillances automatiques et des drones ont été développés pour éliminer ou réduire les inspections effectuées par les techniciens [4, 5]. Une telle détection est limitée aux anomalies visibles. Les instruments utilisés ne permettent pas d'éliminer les contrôles effectués par les humains, mais aident beaucoup et permettent également de détecter un certain nombre de situations à risque non détectables par l'œil humain.

D'autres technologies existent pour une inspection locale et une détection d'endommagement telles que les capteurs à fibre optique, la détection par courants de Foucault, les techniques électromagnétiques et naturellement les ultrasons, utilisant des capteurs avec ou sans contact.

Les capteurs à fibre optique sont capables de mesurer la température et la déformation. Ils sont basés sur la diffusion de Brillouin stimulée. Ce processus de diffusion est une propriété intrinsèque de la propagation de la lumière dans le matériau de silice à partir duquel la fibre de détection est faite. L'effet de la diffusion de Brillouin présente une réaction bien connue et reproductible à une mesure externe comme la température et la déformation. L'interaction de Brillouin se traduit par la génération de la lumière diffusée, qui subit un décalage de fréquence par l'intermédiaire du processus de diffusion. Ce décalage en fréquence dépend linéairement de la déformation de la fibre et de la température. En conséquence, la lumière diffusée a une longueur d'onde légèrement différente de celle de la lumière d'origine et l'écart de la longueur d'onde initiale est directement lié à la déformation et la température de la fibre. Un système basé sur l'analyse de lumière diffusée de Brillouin dans la fibre optique est naturellement consacré à effectuer la mesure de la température et de la déformation [6]. Dans le domaine ferroviaire, les capteurs à fibre optique distribués peuvent être utilisés pour une surveillance spatiale continue de la température et de la déformation des voies, de l'intégrité structurelle des infrastructures comme les tunnels et les ponts [38, 39].

Le contrôle par mesure du courant de Foucault a longtemps été un standard pour la détection de fissures surfaciques ou internes dans les métaux [7]. Cette technique est souvent utilisée pour tester des matériaux dans des opérations sur le terrain [40]. Dans le domaine aéronautique, les parties critiques des avions sont vérifiées régulièrement pour détecter les fissures, en surface ou à faible profondeur, en utilisant un système à courants de Foucault portable. ces capteurs à courants de Foucault sont également utilisés pour l'inspection des voies ferrées [41].

Parmi les techniques électromagnétiques, on peut citer la technique ACFM (Alternating Current Field Measurement). C'est une technique de contrôle non destructive sans contact développée pour détecter et dimensionner des défauts plans débouchant sur différents matériaux conducteurs. Elle est capable de détecter des défauts surfaciques et de les dimensionner en terme de longueur et profondeur. La technique ACFM a été introduite comme méthode de contrôle depuis 1990 et fait l'objet d'une recommandation technique publiée par le COFREND en 2003, recommandation pour le contrôle des soudures par la mesure d'un courant alternatif [42]. La technique ACFM est basée sur la formation d'un courant électrique alternatif uniforme induit dans la peau du matériau à examiner. Ce courant induit produit un champ magnétique qui, en présence d'un défaut, sera perturbé et circulera autour des extrémités de celui-ci. Des techniques spéciales sont utilisées pour induire ces courants électriques et les éléments nécessaires sont intégrés dans les sondes ACFM. La sonde ne nécessite aucun contact électrique avec le composant et peut donc être appliquée sans enlèvement des revêtements de surface. Contrairement aux capteurs de courants de Foucault qui nécessitent d'être placés à proximité de la surface inspectée et à distance constante (<2 mm), un décollement maximale (liftoff, effet de bord) de fonctionnement de 5 mm est possible sans perte significative du signal en utilisant les sondes ACFM. Cela est dû au fait que lors d'un petit décollage l'intensité du signal diminue avec le carré de lift-off et non pas avec son cube ce qui est le cas pour les capteurs à courant de Foucault. Cela permet à cette technique de fonctionner avec plus de lift-off et des revêtements non conducteurs plus épais. Une autre technique électromagnétique nommée GPR (Ground Penetration Radar) utilsant des impulsions radar exactement de la même manière que des impulsions ultra-sonores sont utilisées pour l'imagerie des matériaux sous-sol [43]. A la place des impulsions ultra-sonores, la méthode GPR utilise un rayonnement électromagnétique et détecte les signaux réfléchis par les structures sous-sol. Cette technique permet la détection des objets, des changements dans les matériaux et des fissures. Cette technique peut être utilisée pour évaluer l'enrobage de béton, dalles et l'épaisseur de la chaussée. Par conséquent, dans le domaine ferroviaire cette technique est utilisée principalement pour évaluer et caractériser la plate-forme (sol support) et le lit de la voie [44].

La thermographie infrarouge fait partie des techniques de CND sans contact bien connus. Le matériau à évaluer est d'abord chauffé par une lampe flash ou une technique inductive. Ensuite, l'évolution spatio-temporelle du champ thermique est surveillée par une caméra infrarouge. Si des défauts sont présents, la conductivité thermique est réduite localement de telle sorte que des «hot spots » de température élevée peuvent être détectés. De la variation temporelle du champ thermique, des informations supplémentaires sur la profondeur et la taille du défaut peuvent être extraites [45, 46, 47]. Cette technique a déjà montré son potentiel élevé pour la caractérisation des défauts typiques dans les rails. Il a pu être démontré que cette technique permet essentiellement de caractériser les rails avec une sensibilité élevée et une grande vitesse d'essai. Tout comme les techniques ultrasonores et les méthodes électromagnétiques, un système de thermographie peut également être intégré dans un train d'essai.

On citera également, l'inspection radio-graphique [8, 48, 49] qui fait partie des techniques de CND traditionnelles. Elle utilise les rayons X pour radiographier un échantillon et pour afficher l'atténuation locale des rayons X. La radiographie nécessite généralement un double

accès à la surface de la structure inspectée car une phase de transmission est couramment utilisée. Cette méthode est utilisée dans plusieurs domaines comme l'industrie nucléaire. Par conséquent, les applications dans le domaine ferroviaire sont limitées aux cas où les composants ou les parties de composants sont facilement accessibles et ont une faible épaisseur (dans le cas des métaux). Ceci est en partie valable pour l'inspection du matériel roulant dans le cadre de tests de roue ou de l'inspection de la plate-forme de la voie, par exemple. Néanmoins, les applications utilisant la radiographie à rayon X sont très rares dans le domaine ferroviaire. Ceci est causé par les grandes dimensions des échantillons essentiellement métalliques (faible profondeur de pénétration) et les règles de sécurité nécessaires pour les rayonnements ionisants.

Toutefois, les techniques ultra-sonores restent les méthodes les plus couramment utilisées dans l'évaluation non destructive avec une grande variété de champs d'application. Dans la plus part des cas, une impulsion à "large bande" est envoyée par un transducteur piézoélectrique (émetteur) dans la structure via un couplant approprié (eau, huile, pâte visqueuse, miel,...). Les ondes générées interagissent avec des défauts présents dans la structure évaluée et sont réfléchies pour être détectées par un capteur (récepteur). Ce dernier peut être soit le même transducteur utilisé pour l'excitation ou un autre capteur. Les techniques ultra-sonores sont bien connues dans l'inspection du matériel roulant des lignes à grande vitesse en Europe et à l'étranger [9]. Une autre approche bien connue utilise les transducteurs acoustiques électromagnétiques (EMATs) pour l'excitation et la détection des ondes ultra-sonores [10]. Malheureusement, l'efficacité et la sensibilité de ces méthodes n'est pas comparable avec des transducteurs piézoélectriques. Le problème du décollage (lift-off : distance entre transducteur EMAT et la surface de la structure) est un point crucial dans l'inspection des voies ferrées par exemple. Les systèmes EMAT sont utilisés notamment dans l'inspection des roues.

c) Le Contrôle-Santé Intégré (CSI)

Bien que la plupart des techniques présentées dans le paragraphe précédent soient performantes, leur utilisation fréquente entraîne des inconvénients majeurs. En premier, le fait que les mesures et les interprétations des résultats sont la plupart du temps réalisées par des agents. En second lieu, la résolution spatiale est souvent faible et nécessite un accès à la zone inspectée. Enfin, ces techniques imposent l'immobilisation des parties mobiles et pour certaines le démontage des pièces à contrôler, ce qui rend le contrôle long et coûteux. Dans le domaine des transports, la maîtrise des coûts d'exploitation et de maintenance étant également un souci majeur pour les acteurs du secteur, il en découle un intérêt grandissant pour des systèmes de contrôle embarqués. Ceux-là doivent être capables d'assurer une surveillance permanente des structures, pièces et infrastructures. Ce besoin s'est fait sentir et a guidé dans ce sens les recherches de nombreux laboratoires et entreprises.

L'ensemble des constatations faites ici nous amène à la conclusion qu'il y a un réel besoin de développement de systèmes de contrôle directement intégrés à la structure : on parle alors de Contrôle-Santé Intégré, ou SHM en anglais (Structural Health Monitoring). Le CSI suscite un engouement considérable ces dernières années et fait l'objet d'études approfondies. Cependant, les exigences imposées en termes de sécurité et de réduction des coûts de maintenance

ont orientées les recherches vers une autre façon d'effectuer la maintenance des structures, particulièrement dans les domaines du génie civil et du transport (Aérien, terrestres et maritimes). A moyen terme, des capteurs seront déposés sur les surfaces des structures (ou dans les structures dans le cas du domaine du génie civil) durant leur fabrication, afin de disposer de systèmes d'évaluation non destructive, qui les accompagneront durant leur vie. Délivrant ainsi à tout instant un diagnostic sur leur intégrité et sur leur durée de vie. Ainsi, ces systèmes permettront la programmation des interventions de maintenance nécessaires et donc une réduction des coûts sans réduire la fiabilité des contrôles.

La plupart des méthodes envisagées en CSI par ondes guidées consistent à répartir sur la structure un ensemble de transducteurs (émetteurs et récepteurs). L'inspection de la structure peut être alors effectuée par propagation des ondes entre les couples de transducteurs (FIGURE 1.9.a). Une autre configuration est possible, elle est basée sur un émetteur central et des récepteurs répartis (FIGURE 1.9.b). Dans ces deux configurations, les trajets directs entre émetteurs, récepteurs et défauts sont exploités, notamment afin de pouvoir faire le lien entre temps de vol et distances. Dans le cas de beaucoup de situations réelles, un grand nombre de réflexions multiples sur des bords ou des hétérogénéités quelconques viennent s'ajouter aux premiers paquets d'ondes. L'inconvénient est alors : d'une part que ces paquets d'ondes ne sont pas toujours dissociables les uns des autres, ce qui complique l'interprétation des signaux et d'autre part, que les réflexions multiples sont potentiellement porteuses d'informations sur le milieu, il est donc dommage de ne pas les exploiter.

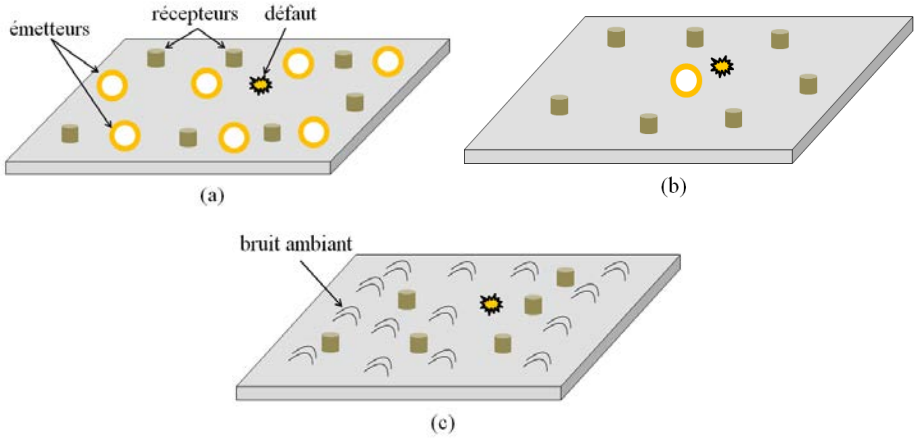


FIGURE 1.9 – Configurations possibles pour un système de CSI. (a) plusieurs émetteurs/plusieurs récepteurs. (b) 1 émetteur, plusieurs récepteurs. (c) pas d'émetteur, plusieurs récepteurs.

Lorsqu'un bruit ambiant, diffus, est présent naturellement dans la structure à inspecter (1.9.c), on montre que l'intercorrélation des champs enregistrés entre deux points du milieu converge vers la fonction de Green (réponse impulsionnelle). Cette approche a été exploitée dans plusieurs domaines. Cette configuration sera étudiée en détail dans le chapitre 2 dans un contexte ferroviaire.

1.4.2 WSNs - CSI : Vers des infrastructures ferroviaires intelligentes

La gestion efficace de l'infrastructure ferroviaire est essentielle pour le développement, la modernisation et l'expansion des réseaux ferroviaires, en particulier si elle est couplée avec la transition vers des infrastructures intelligentes [50, 51]. Un des éléments clé d'une gestion efficace est le contrôle de l'intégrité structurelle. Le CSI détecte et identifie les anomalies des structures et des infrastructures avant qu'elles provoquent une défaillance ou l'arrêt des services. Dans un contrôle-santé simple, les capteurs surveillent l'état de santé d'une structure, ou d'une pièce mécanique. Si les relevés du capteur atteignent une limite prédéterminée ou par défaut, une alarme est activée. Cependant, cette approche simpliste peut conduire à un grand nombre de fausses alarmes et de défaut non détectés [52]. Elle ne fournit qu'une analyse locale et ne profitent pas des capacités que peuvent fournir les capteurs lorsqu'ils sont en réseau et leurs données analysées et traitées collectivement. Les capteurs mis en réseau et le traitement intégré des données permettent une vision globale de l'état de la structure et de ses conditions de fonctionnement [53].

Avec le développement des technologies réseau comme les réseaux de communication sans fil et Ad'Hoc mobiles associées avec les technologies d'intégration des capteurs et des microprocesseurs, il est possible de mettre en réseau un grand nombre de capteurs [11, 54, 55, 56] pour une surveillance permanente de l'état de santé des machines, systèmes et environnements. Les WSNs utilisent des capteurs distribués spatialement pour inspecter collectivement les infrastructures. Les WSNs et l'analyse des données permettent de transformer les données prélevées en intelligence [57]. Ils fournissent une aide à la décision par un prélèvement et traitement d'informations continues et en temps réel pour prévenir les situations à risque [58]. Les données provenant des WSNs sont constamment surveillés à l'aide de la classification [59, 60], prédiction [61], ou détection d'anomalies [62] pour déterminer le statut actuel et future du réseau. Lopez-Higuera et al. [63] ont décrit les fonctionnalités d'un système SHM en forme d'escalier (Figure 1.10), où plus le niveau est élevé, plus la fonctionnalité est complexe. Le niveau le plus simple est le niveau 1, le système détecte la présence ou pas de défaut sans information sur sa position, le niveau 2 fournit l'information sur sa localisation. Un système de niveau 3 est capable de classer par niveau la gravité de l'anomalie tandis qu'un un système de niveau 4 peut estimer les conséquences des dommages et la durée de vie restante. Enfin, un système de niveau 5 comprendra du matériel complexe, des algorithmes personnalisés et des logiciels pour permettre le diagnostic et/ou le pronostic et même de recommander la solution à un problème.

Les WSNs pour le contrôle-santé des structures et infrastructures fournissent :
- Un suivi continu et une acquisition des données en temps quasi-réel ;
- Une augmentation de la fréquence des contrôles comparée à une inspection manuelle ;
- Amélioration de l'accessibilité des données, leur gestion et leur utilisation par le réseau, contrairement aux systèmes où les données doivent être collectées et ensuite traitées au centre ;
- Possibilité de combiner des données provenant d'une grande variété de capteurs ;
- Analyse intelligente des données pour " prédire et prévenir " des événements à l'aide

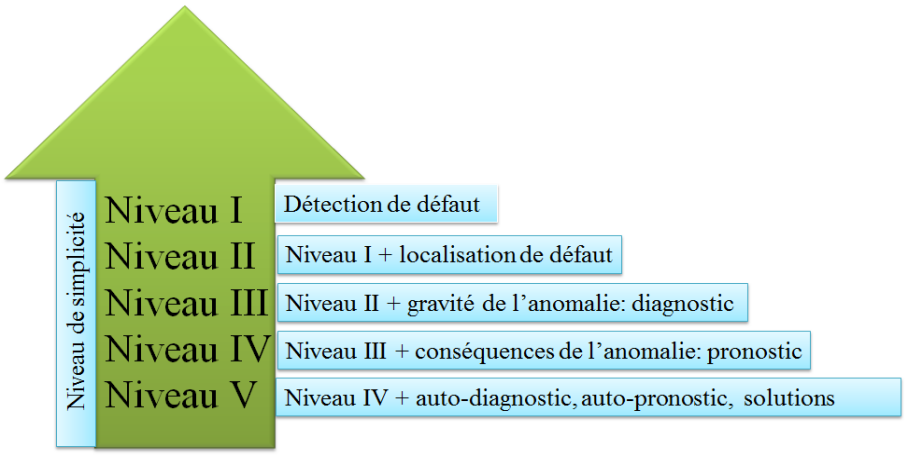


FIGURE 1.10 – Les fonctionnalités d'un système SHM en forme d'escalier. Plus le niveau est élevé, plus la fonctionnalité est complexe.

d'algorithmes intelligents ;
- Capacité de transformer les données en informations sur l'état d'intégrité des structures critiques, de l'infrastructure et une vision globale sur la tendance des informations pour déterminer où se produit la dégradation et avec quelle vitesse.

Étant donné la multitude de leurs avantages, les WSNs peuvent être utilisés pour :

- Vérifier et assurer la stabilité des structures, machines, systèmes et processus ;
- Détecter les besoins d'entretien ;
- Minimiser les temps d'arrêt ;
- Prévenir les défaillances, économiser temps et argent ;
- Transition vers une maintenance basée sur la prédiction d'anomalie plutôt que de la maintenance basée sur un calendrier standard ou demandée suite à une panne ou défaillance.

Bien que les WSNs représentent une technologie prometteuse pour les systèmes de surveillance et de contrôle-santé structurel, ils doivent répondre à un certain nombre de défis. Ces systèmes génèrent de grandes quantités de données avec des débits élevés. Ces données peuvent être remontées à partir de sources multiples et doivent être fusionnées. Les systèmes et les structures surveillées au moyen de capteurs présentent souvent un comportement complexe, qui est difficile à comprendre et à interpréter [64]. Par conséquent, les données doivent être gérées avec soin pour fournir une vue de l'état du système. Les données des capteurs sont très bruitées et les capteurs eux-mêmes peuvent devenir défectueux partout où ils sont installés. Les données des capteurs peuvent également contenir des erreurs, en particulier lorsque les capteurs sont soumis à des conditions rudes car cela accentue les défaillances des capteurs et de la communication.

Les capteurs sont souvent installés dans des environnements difficiles pour surveiller des structures et des infrastructures. Dans la référence [65], les auteurs précisent que leur système a fonctionné dans des conditions extrêmes en Suède, avec une gamme de température entre

+25°C et −40°C et avec de grandes quantités de neige. Grudén et al. [66] ont monté des capteurs sur les bogies du train pour surveiller les températures des bogies et ont noté que les environnements de train sont difficiles pour les composants électroniques avec des fortes accélérations et des chocs importants. Les capteurs doivent être situés et placés avec soin pour s'assurer que leurs mesures sont utiles et ne reproduisent pas les mesures d'autres capteurs voisins, ce qui peut biaiser la répartition des données récoltées. Le type de capteur utilisé doit être soigneusement examiné pour assurer une valeur maximale et des données de qualité. Les WSNs peuvent utiliser un ensemble de capteurs homogènes ou hétérogènes. Les capteurs sont souvent situés loin d'une source d'énergie, ainsi, des piles, batteries ou une forme de récupération et/ou production d'énergie locale pour les alimenter est nécessaire. S'il y a des erreurs dans la transmission à travers le réseau sans fil, les données peuvent être perdues. Ces deux derniers points forment un paradoxe, les WSNs pour la surveillance-santé des infrastructures ferroviaires doivent fonctionner avec un minimum d'énergie et assurer une communication efficace nécessite de l'énergie.

1.4.3 Capteurs utilisés et éléments inspectés

Les données remontées par les capteurs sont traitées par la station de traitement. Les données sont collectées en continu, périodiquement ou bien par séquences prélevées en Ad'Hoc. Par exemple, prélevées à chaque passage d'un train. Le prélèvement peut être déclenché par la recherche de seuils(triggers), signatures de problèmes connus (classification), identification d'événements inconnus (analyse à court terme en utilisant la détection des valeurs aberrantes), ou identification de la dérive sur une plus longue période de temps (détection des valeurs aberrantes à long terme).

a) Les différents capteurs utilisés

Il y a une multitude de capteurs utilisés dans le domaine de la surveillance ferroviaire pour analyser différents aspects de l'état des structures, des infrastructures et des machines. Les différents types de capteurs utilisés dans ce domaine sont résumés dans le tableau 1.4.

b) Les réseaux fixes et mobiles (embarqués)

Le contrôle-santé de l'infrastructure ferroviaire peut être continu ou périodique. Le contrôle continu permet de détecter une éventuelle anomalie aussitôt, mais ce procédé est coûteux, gourmand en énergie, ce qui est un problème pour les WSNs où les nœuds du réseau ont besoin de minimiser leur consommation. De plus, les données des capteurs sont souvent bruitées et nécessitent un pré-traitement pour assurer un diagnostic précis. Un contrôle-santé périodique est moins chers, moins gourmand en énergie et permet du temps pour le conditionnement et le filtrage des données prélevées. Toutefois, une anomalie ne sera diagnostiquée qu'à la prochaine inspection. Ce principe de fonctionnement peut être acceptable pour certaines situations qui évoluent lentement, comme le développement des fissures sur les ponts,

Type de capteur	**Description et exemple d'utilisation**.
Accéléromètres	Les WSNs ferroviaires utilisent les accéléromètres pour la mesure des vibrations sur les pistes métalliques, les poutres des ponts ou accélérations latérales des pièces mécaniques telles que les roues. Ils sont robustes, fiables, faciles à calibrer et pas chers. Souvent utilisés avec des jauges de contrainte [67].
Déplacement	Ils peuvent contrôler le mouvement à travers les fissures et les joints des panneaux préfabriqués en béton dans les tunnels ferroviaires [68] pour s'assurer de la stabilité de la structure.
FBG (Fiber Bragg Grating)	Mesure de la température [69], pression [69] et accélération [70].
Gyroscopes	Mesure des accélérations longitudinales, latérales et verticales [71] ce qui les rend idéals pour l'analyse des chariots, châssis et bogies.
Inclinomètres	Mesure d'angle d'inclinaison. Les inclinomètres peuvent détecter des distorsions dans les structures de chemin de fer en détectant les changements d'inclinaison [68].
Lumière (Ultra-Violet)	Analyse des pantographes.
Magnétoélectriques	Ils peuvent être utilisés pour l'analyse du champ magnétique dans les câbles électrique, et ainsi surveiller le courant. Ils sont passifs, étant donné qu'il sont alimentés par induction.
Piézoélectriques	**PZT** : mesure de contrainte, pression, vibration, choc. Peuvent être montés sur les roues pour surveiller les déplacements sur les surfaces des roues afin de détecter d'éventuels défauts sur les roues [72]. Ils sont moins chers, plus facile à fabrique et à utiliser que les capteurs optiques.
	AE (Acoustic Emission) : ce sont des transducteurs piézoélectriques passifs (capteurs à haute fréquence) [73]. Les capteurs à AE sont capables de détecter des défauts dans les structures où les fissures se développent [74]. Un inconvénient de ce type de capteurs est que leurs données sont volumineuses et nécessitent des algorithmes efficaces et précis pour les traiter et les interpréter [74].
	SAW (Surface Acoustic Wave) : ils convertissent le signal d'entrée électrique en onde mécanique en utilisant un matériau piézoélectrique. Ils convertissent ensuite l'onde réfléchi en un signal électrique pour être analysé. Les ondes mécaniques sont affectées par des phénomènes physiques tel que la température, ainsi les capteurs SAW sont utilisés pour mesurer les changements de température dans l'essieu des véhicules ferroviaires [75]. Ces capteurs sont très sensibles et stables mais les ondes sont affectées par les liquides, ainsi les capteurs SAW doivent être secs.
Jauges de contrainte	Mesure de la contrainte locale et génère un signal opposé à la contrainte appliquée au capteur. Les jauges de contraintes sont utilisées souvent pour la mesure de la force verticale et latérale appliquée au rail entre deux traverses [76, 65] quand les trains passent.
Température (thermocouples)	Dans les applications ferroviaires les capteurs de températures sont utilisés pour mesurer la température atmosphérique, du lit de la voie [77], du châssis du train et des pièces mécaniques [66, 64, 78, 79].
Ultrasonores	Pour enregistrer les ondes élastiques dans la structure dues aux vibrations causées par le passage d'un train [80].

TABLE 1.4 – Les capteurs utilisés avec les WSNs dans la surveillance des structures ferroviaires, inspiré de [2].

mais pour des scénarios critiques, une surveillance continue est nécessaire.

La topologie des WSNs varie souvent au fil du temps. Un facteur important dans cette variation de topologie est la mobilité des nœuds capteurs. Lorestani et al. [81] ont divisé le réseau de communication en deux : le réseau fixe concerne les nœuds capteurs installés dans des endroits fixes tels que les ponts et les tunnels, alors que le réseau mobile concerne les nœuds installés dans des locomotives ou des Wagons. Les données du réseau mobiles sont accompagnés des coordonnées GPS. Les nœuds mobiles (embarqués) peuvent inspecter la voie parcourue par le train et les sections du train où les capteurs sont installés [82]. En revanche, les nœuds capteurs montés sur rail (fixes) peuvent prélever des mesures sur le train qui passe, mais seulement à des endroits spécifiques correspondants aux emplacements des nœuds sur la voie. Ce compromis doit être pris en considération lors de la conception du réseau et du choix des emplacements des nœuds. Par la suite, une analyse des réseaux de capteurs pour la surveillance des infrastructures ferroviaires est développée.

1. Réseaux de capteurs sans fil pour l'inspection des éléments fixes : De nombreux chercheurs ont étudié le contrôle-santé des infrastructures, y compris les ponts, les tunnels, les voies ferrées et d'autres infrastructures du réseau ferroviaire. La surveillance de l'intégrité structurelle est d'autant plus importante que la vitesse et la charge des trains. Jusqu'à récemment l'inspection s'effectuait visuellement [83], mais cette méthode permettait d'examiner la structure superficiellement et de façon intermittente. En outre, l'analyse visuelle doit être interprétée par un expert, qui peut être subjectif. Les capteurs sont objectifs et peuvent fournir des données sur l'ensemble de la structure (y compris interne) pour permettre une évaluation de son état de santé et une analyse de sa durabilité et de sa durée de vie restante. Des capteurs filaires peuvent être utilisés pour la surveillance-santé. Cependant, les systèmes câblés sont chers, peu flexibles, demandent un temps d'installation long et les trains doivent être arrêtés lors de l'installation [83].

Les réseaux de capteurs fixes pré-installés sont simples, telles que fixer des capteurs sur les rails pour surveiller la température du rail ou des capteurs de surveillance de l'alimentation des moteurs [84]. Ces systèmes génèrent une sortie binaire simple (haute ou basse). Pour le capteur de température, un expert ferroviaire avec la connaissance des températures ambiantes ferroviaires (sans contrainte) fixe les niveaux d'alarme pour « orange » et « rouge ». Si un niveau d'alarme est atteint, le système envoie une alerte. Les WSNs modernes fournissent une analyse semi-automatique ou automatique des données des capteurs pour examiner les changements structurels et améliorer la durabilité des structures. Par conséquent, la surveillance par des WSNs permet de réduire les coûts de maintenance.

2. Réseaux de capteurs sans fil embarqués (mobiles) : Les WSNs sont aussi capables de surveiller différentes pièces mécaniques, systèmes et environnement en utilisant des capteurs embarqués pour mesurer des paramètres tels que la température, le choc, l'inclinaison et l'humidité [85]. Ainsi, les WSNs sont une plateforme prometteuse pour la surveillance des systèmes de transport, permettant la détection précoce d'anomalies. Un aperçu des possibilités offertes par les systèmes de surveillance embarqués des pièces mécaniques est donnés

dans les références [86, 87, 88].

Une des problématiques clés dans la surveillance-santé avec des capteurs mobiles est la communication, en raison de la mobilité des capteurs. Les données en provenance des nœuds mobiles peuvent être transmises à un nœud fixe lorsque ce dernier est à portée. Le transfert de données depuis les nœud mobiles à un nœud statique se fait souvent quand le train s'arrête dans une station. Alternativement, les nœuds mobiles (embarqués) peuvent former un réseau avec une station de base. Si les nœuds forment un réseau dans le train, la station de base est souvent montée dans la locomotive. La station de base transmet les données récoltées à un centre de traitement par un mécanisme approprié, tel que le GSM.

1.5 Objectifs et enjeux de notre travail de recherche

1.5.1 Le CSI au sein de l'IEMN

Dans notre laboratoire, la thématique du CSI a été abordée depuis quelques années pour des applications SHM dédiées au domaine des transports, en particulier, à la détection et l'imagerie passive de défauts dans des milieux réverbérants. Différents travaux ont été réalisés sur des plaques et tubes pour des applications tournées principalement vers le domaine aéronautique. Un des objectifs principal est le développement de réseaux de capteurs CSI à basse consommation, purement passif.

Concernant les plaques minces réverbérantes, on peut citer les travaux d'E. Moulin [89] et de N. Abou Leyla [90] qui montrent la possibilité de détection d'un défaut dans une plaque en dépit d'une distribution non uniforme des sources de bruit sur celle-ci. Cette approche est ensuite appliquée au structures de type tubes dans les travaux de S. Djili et al. [91]. La fonction de Green est estimée par corrélation de l'écoulement d'eau dans un tube d'acier, entre deux transducteurs passifs. La reproductibilité de la fonction d'intercorrélation et sa sensibilité à la présence d'un défaut ont été vérifiées pour des fréquences allant de 200 Hz à 35 kHz. Par la suite, H. Achdjian [92], montre dans ses travaux de thèse qu'une estimation passive de l'énergie injectée par les sources ambiantes dans le milieu peut être obtenue par corrélation des signaux enregistrés entre deux capteurs en écoute passive. Plus récemment, L. Chehami [93], dans ses travaux de thèse (soutenue le 01/12/2015 à l'Université de Valenciennes), a démontré que cette approche peut être appliquée pour détecter et localiser des défauts (fissures, trous, rainures) dans les plaques minces réverbérantes en utilisant un faible nombre de capteurs. Il a été démontré que ce type de méthode pourrait être utilisé pour caractériser un défaut dans une structure réverbérante.

Dans tous les travaux décrits dans la bibliographie et notamment concernant les systèmes de surveillance des structures et infrastructures ferroviaires, ainsi que les travaux sur le CSI des milieux réverbérants, la littérature ne s'est intéressé qu'à des structures de type tubes et plaques, en particulier pour une application aéronautique. Aucun travail n'a traité l'application de l'approche CSI aux structures ferroviaires telles que les rails et les roues. De plus, les travaux existants sur la détection passive de défauts ne considèrent pas la mise en réseau

des différents capteurs avec des liens sans fil. Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit trouve son originalité dans ce contexte. Comme nous le verrons par la suite, il s'agit de mettre en place une plateforme de "réseau de capteurs". L'idée est d'intégrer l'aspect réseau dès les phases amonts de conception du système.

1.5.2 Objectif des travaux présentés dans ce manuscrit

Les résultats des travaux de recherche sur la thématique du CSI au sein de notre laboratoire ont permis de mettre au point des algorithmes de détection d'endommagement basés sur des techniques acoustiques passives. Le principe de mesure a d'ores et déjà montré sa validité au laboratoire sur des structures de type plaques minces ou tubes, à partir d'un petit nombre de capteurs filaires classiques reliés à un dispositif d'acquisition standard (oscilloscope, interface GPIB).

Dans la continuité de ces travaux, le but ultime des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit est d'étudier la faisabilité d'une plateforme de communication pour les réseaux de capteurs sans fil, autonomes et intégrables pour une application réelle de CSI. Plus précisément, on s'intéresse à des applications de type "ambient noise correlation", rendant possible une inspection des structures, en disposant des capteurs en écoute passive uniquement, sans avoir recours à des émissions ultrasonores. Cependant, la présence d'un grand nombre de sources acoustiques naturelles dans le milieu ferroviaire, comme le bruit généré par le contact roue-rail et les bruits aérodynamiques rend cette application éligible. Ainsi, une telle application est d'un grand intérêt d'un point de vue limitation de la consommation d'énergie.

Ce travail s'intéresse d'une part, à la partie acoustique qui consiste à exploiter les signaux acoustiques quasi-aléatoires se propageant dans la structure pour la détection de défauts. Ainsi, nous validons dans le chapitre deux l'approche de CSI par corrélation de bruit dans un contexte ferroviaire et nous établissons les conditions expérimentales de convergence vers la fonction de Green.

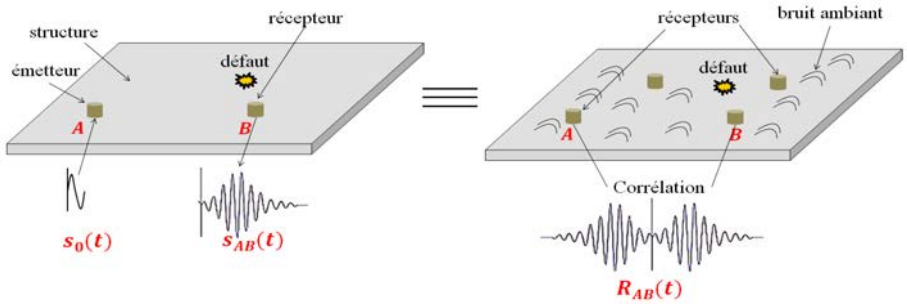


FIGURE 1.11 – Reconstruction de la fonction de Green entre deux points à partir de la corrélation des bruits acoustiques mesurés en ces deux point.

D'une autre part, nous nous intéressons à la définition des procédés de pré-traitements nécessaires pour le conditionnement des signaux afin de les rendre compatibles avec les contraintes de la communication sans fil basse consommation. Afin de remplacer les liaisons filaires entre les capteurs et la station de base, permettre une couverture plus large et

dense et de mettre en réseau les capteurs, nous proposons dans le chapitre trois une solution basée sur la technologie ZigBee.

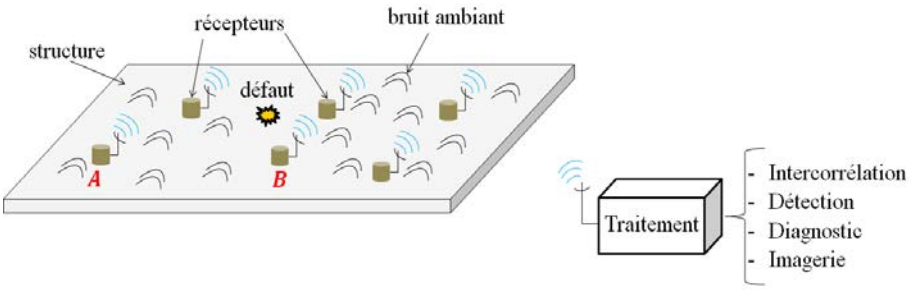


FIGURE 1.12 – Surveillance passive des structures par un système de CSI basé sur la technologie ZigBee.

Nous montrerons expérimentalement que cette technologie nous permet de transmettre, en un seul saut, des données sur un rayon de 75 m dans un environnement ferroviaire. Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons également à l'aspect communication sans fil des données des capteurs vers la station de base et à la gestion du réseau. Ces deux derniers points feront l'objet du chapitre quatre.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les notions de bases sur les réseaux de capteurs sans fil sont rappelées, dans un premier temps. Nous avons présenté les WSNs d'une manière générale en mettant l'accent sur leur mise en œuvre et les différentes contraintes liées à leur conception. Dans un deuxième temps, Nous nous sommes concentrés sur l'architecture matérielle d'un nœud capteur en passant en revue les types de nœuds capteurs, les éléments les constituants et leurs caractéristiques particulières. Ensuite, nous avons identifiés les différentes familles des WSNs. Finalement, après avoir présenté les particularités de ces réseaux, nous avons souligné la nécessité et l'apport des WSNs dans différents domaines à travers des exemples d'application allant du domaine militaire aux réseaux d'instrumentation et de mesures, en passant par le domaine du contrôle non destructif des structures, recueillies d'après plusieurs références bibliographiques. Ce domaine d'application est étroitement lié à l'objectif principal de ce travail de thèse, qui est de développer une plateforme de communication sans fil pour le contrôle-santé des structures ferroviaires.

Une recherche sur les systèmes de surveillance-santé des infrastructures ferroviaires a été conduite et les différents capteurs et plateformes ont été décrit. Les problématiques de la communication sans fil et de la minimisation de la consommation d'énergie dans un environnement ferroviaire ont été posées. Dans ce sens, notre système de CSI se basera sur des techniques acoustiques passives de contrôle par corrélation de champ de bruit. Afin d'évaluer les capacités d'une telle technique, il apparaît essentiel d'étudier la faisabilité de cette méthode dans un contexte ferroviaire.

CHAPITRE 2

Étude expérimentale de la méthode de corrélation de bruit acoustique pour le contrôle-santé passif des rails

Sommaire

2.1 Introduction 34
2.2 Fonction de corrélation - Estimateur de corrélation 35
2.2.1 Fonction de corrélation : rappels 35
2.2.2 Estimateur de corrélation 36
2.3 Reconstruction passive de la réponse active : bases théoriques . 37
2.4 Conditions de convergence vers la réponse active sur un échantillon de rail 40
2.4.1 Capteurs utilisés 40
2.4.2 Mesure de la réponse active 42
2.4.3 Mesure de l'inter-corrélation de bruit 43
2.5 Application à la détection de défaut 48
2.5.1 Sensibilité à un défaut local 48
2.5.2 Extraction des informations cohérentes 52
2.6 Conclusion 54

2.1 Introduction

Les systèmes d'inspection ultrasonore conventionnels utilisent le contrôle actif. Avec les méthodes classiques, pour caractériser un milieu entre deux points donnés, il est courant d'étudier la fonction de Green entre eux. Cette fonction est la réponse impulsionnelle en un point, à une impulsion émise à l'autre point. Ce type de contrôle nécessite l'utilisation d'une source active, ce qui rend le système plus complexe et plus gourmand en consommation d'énergie. Dans ce contexte, la possibilité d'effectuer un contrôle passif en utilisant des transducteurs en écoute uniquement est d'un grand intérêt.

Des études théoriques et expérimentales dans plusieurs domaines ont montré le potentiel d'une technique originale qui est basée sur la corrélation des champs de bruit acoustique [94, 95, 89, 96]. Basée sur la reconstruction passive de la fonction de Green [97], le principe est qu'un tel champ, ordinairement considéré comme du bruit dans les méthodes de CND classiques, peut être judicieusement exploité pour estimer la réponse active du milieu entre deux points de mesure sans avoir recours à une source ultrasonore active en un de ces points. Cette technique peut, en effet, offrir l'opportunité d'un contrôle en temps réel dans toutes les situations où un bruit acoustique ambiant existe. L'utilisation des capteurs passifs au lieu des émetteurs-récepteurs est un atout indéniable dans un contexte réseau de capteurs où l'énergie est une ressource limitée.

L'objectif de ce chapitre sera d'étudier la faisabilité de la technique de corrélation de bruit dans un contexte ferroviaire. En effet, quand un train est en mouvement les interactions dynamiques entre les roues et les rails génèrent naturellement des ondes élastiques guidées dans les rails. La présence de ces ondes, qui peuvent être considérées comme un bruit ambiant puisque leur excitation n'est pas contrôlée, rend en effet, l'application de cette approche par corrélation de bruit ambiant dans le domaine ferroviaire éligible. Nous présentons dans ce chapitre une première étude en laboratoire visant à évaluer l'applicabilité de cette approche dans ce contexte particulier d'un guide d'onde élastique à une dimension.

Tout d'abord, les bases théoriques de la reconstruction de la fonction de Green à partir des corrélations de bruit sont brièvement rappelées. Une relation théorique explicite entre les réponses actives expérimentales et une version post-traitée des fonctions de corrélation de bruit est donnée. Ensuite, le degré de validité de cette relation est testé expérimentalement sur un échantillon de rail réel. Le bruit ambiant est simulé par des patches piézo-électriques couplés à l'échantillon de rail et alimentés avec un générateur de bruit électrique large bande. Enfin, les fonctions de corrélation de bruit sont appliquées à la détection d'une hétérogénéité locale (défaut) dans l'échantillon de rail. Les résultats obtenus montrent clairement une sensibilité au défaut dans les conditions expérimentales considérées. Par ailleurs, nous montrons que l'introduction d'informations spatio-temporelles par l'utilisation de plusieurs distances défaut-capteurs et la comparaison avec les courbes de dispersion numériques permettent une meilleure caractérisation de la signature du défaut extraite par le procédé de corrélation de bruit.

2.2 Fonction de corrélation - Estimateur de corrélation

2.2.1 Fonction de corrélation : rappels

La fonction d'inter-corrélation $R_{AB}(\tau)$ entre deux signaux aléatoires u_A et u_B supposés stationnaires, est donnée par :

$$R_{AB}(\tau) = E[u_A^*(t)u_B(t+\tau)], \tag{2.1}$$

en continu et par :

$$R_{AB}(m) = E[u_A^*(n)u_B(n+m)], \tag{2.2}$$

en discret et où E est l'espérance mathématique.

Pour des signaux déterministes réels à puissance moyenne finie, la fonction d'inter-corrélation notée $\varphi_{AB}(\tau)$, peut être calculée par :

$$\varphi_{AB}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{[T]} u_A(t)u_B(t+\tau)dt = u_A(-\tau) \otimes u_B(-\tau), \tag{2.3}$$

où $\otimes$ est le produit de convolution, pour des signaux continus, et par :

$$\varphi_{AB}(k) = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{2n+1} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} u_A(n)u_B(n+k). \tag{2.4}$$

pour des signaux discrets. On peut remarquer que si u_A et u_B sont stationnaires :

$$E[\varphi_{AB}(\tau)] = R_{AB}(\tau). \tag{2.5}$$

Enfin, pour des signaux réels à énergie finies, la fonction d'inter-corrélation est donnée par :

$$\varphi_{AB}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_A(t)u_B(t+\tau)dt = u_A(-\tau) \otimes u_B(\tau). \tag{2.6}$$

2.2.2 Estimateur de corrélation

La fonction de corrélation de signaux aléatoires étant une espérance mathématique sur un nombre infini de termes, le calcul exact de cette fonction est impossible. Il faut donc faire une estimation.

La fonction d'inter-corrélation entre deux signaux aléatoires u_A et u_B, réels et stationnaires est donnée par l'équation (2.2). Or, dans la pratique, cette équation ne peut pas être calculée numériquement, d'où la nécessité de faire une estimation. Il existe deux types d'estimateurs : l'estimateur biaisé, et l'estimateur non biaisé.

Dans le cas de l'estimateur non biaisé, l'estimation de la corrélation est donnée par :

$$C_{AB}(m) = \begin{cases} \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} u_A(n)u_B(n+m) & m \geq 0 \\ C_{BA}(-m) & m < 0 \end{cases} \tag{2.7}$$

Dans le cas d'un estimateur biaisé, l'estimation de la corrélation est donnée par :

$$C_{AB}(m) = \begin{cases} \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-m-1} u_A(n)u_B(n+m) & m \geq 0 \\ C_{BA}(-m) & m < 0 \end{cases} \tag{2.8}$$

où la notation C_{BA} désigne l'estimation de R_{BA}

Pour une comparaison objective, on utilise souvent deux grandeurs pour caractériser un estimateur : le biais et la variance. Le biais d'un estimateur est, par définition, la différence entre son espérance mathématique et la vraie valeur recherchée. Soit α une variable aléatoire, et $\tilde{\alpha}$ son estimateur, le biais est donné par :

$$B_{\tilde{\alpha}} = E[\tilde{\alpha}] - \alpha \tag{2.9}$$

Pour un estimateur non biaisé, le biais est nul. La variance d'un estimateur est donnée par :

$$\sigma^2_{\tilde{\alpha}} = E[(\tilde{\alpha} - E[\tilde{\alpha}])^2] \tag{2.10}$$

Un estimateur satisfaisant doit posséder un biais et une variance aussi petits que possible. En général, la diminution de l'un provoque l'augmentation de l'autre et vice versa. Ainsi, pour trouver le bon compromis, on s'intéresse à l'erreur quadratique moyenne, donnée par :

$$E_{qm}(\tilde{\alpha}) = E[(\alpha - \tilde{\alpha})^2] = \sigma^2_{\tilde{\alpha}} + B^2_{\tilde{\alpha}}$$

Il a été démontré dans de nombreux cas [23], que l'erreur quadratique moyenne de l'estimateur biaisé est nettement inférieure à celle de l'estimateur non biaisé. Paradoxalement, le choix devrait se porter sur l'estimateur biaisé. Par la suite, l'estimateur biaisé est utilisé pour estimer la fonction de corrélation.

2.3 Reconstruction passive de la réponse active : bases théoriques

Des études théoriques et expérimentales dans plusieurs domaines [98, 97, 99, 100, 101, 96], ont démontré l'existence d'une relation entre la fonction de Green (réponse impulsionnelle acoustique) entre deux points de mesure et la corrélation des champs de bruit enregistrés au niveau de ces points.

Plus précisément, dans un milieu réverbérant fini, la dérivée temporelle de la fonction de corrélation de bruit $C_{AB}(t)$ entre deux points récepteurs A et B est proportionnelle à la

différence entre les fonctions de Green causale et anti-causale entre ces points. Formellement, cela peut être écrit comme suit [99, 96]

$$\frac{dC_{AB}(t)}{dt} = K\left[G_{AB}(t) - G_{AB}(-t)\right], \tag{2.11}$$

Où K est une constante dépendante des propriétés du milieu dont la valeur précise est non significative ici.

L'hypothèse fondamentale pour la validité de l'équation (2.11) est que le champ de bruit soit parfaitement diffus. Cela signifie que les sources de bruit doivent être réparties uniformément dans le milieu, décorrélées les unes par rapport aux autres et émettent un bruit blanc. Dans ces conditions, la fonction de corrélation de bruit C_{AB} peut être définie comme

$$C_{AB}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} G_{S_iA}(t) \otimes G_{S_iB}(-t), \tag{2.12}$$

Où $\otimes$ est la convolution et $G_{S_iX}(t)$ est la fonction de Green correspondant à la propagation de la source S_i au point X (A ou B).

Cependant, dans des cas réalistes, les fonctions de Green ne sont pas directement mesurables et donc l'équation (2.11) n'est pratiquement pas appropriée. Toutefois, la réponse active du milieu entre les points A et B est accessible à travers le signal expérimental s_{AB} reçu au niveau du capteur B lorsque le transducteur A agit comme une source :

$$s_{AB}(t) = G_{AB}(t) \otimes c(t) \otimes s_0(t), \tag{2.13}$$

Où s_0 est le signal d'excitation injecté au point A et $c(t)$ représente les conversions électromécaniques et réciproques des transducteurs (réponse impulsionnelle de la paire émetteur-récepteur).

De même, le signal reçu à un point donné X lorsque le milieu est soumis à N sources de bruit peut être exprimé comme suit

$$s_X(t) = \sum_{i=1}^{N} G_{S_iX}(t) \otimes c_{S_iX}(t) \otimes n_{S_i}(t), \tag{2.14}$$

Où n_{S_i} est le bruit émis par la $i^{\text{ième}}$ source et c_{S_iX} est la réponse impulsionnelle associée au processus de conversion d'émission-réception.

Il est supposé que toutes les sources de bruit émettent la même puissance moyenne R_n et sont décorrélées les unes des autres. Formellement, cela signifie que les fonctions de corrélation des bruits émis sont données par

$$R_{n_{S_i},n_{S_j}}(t) = R_n(t)\,\delta_{ij}, \tag{2.15}$$

Où δ_{ij} est le delta de Kronecker.

En supposant en outre que toutes les paires de transducteurs ont la même réponse ($c_{S_iX} = c_S, \forall i$), la fonction d'inter-corrélation des signaux reçus aux points A et B, respectivement, est ensuite exprimée par

$$R_{AB}(t) = \sum_{i=1}^{N} G_{S_iA}(t) \otimes G_{S_iB}(-t) \otimes \varphi_c(t) \otimes R_n(t), \tag{2.16}$$

Avec $\varphi_c(t) = c_S(t) \otimes c_S(-t)$.

On peut remarquer que l'absence des termes croisés dans l'équation (2.16) (En raison de la décorrélation des sources de bruit) signifie que la somme des fonctions de corrélation sur les sources de bruit est théoriquement équivalente à la somme des signaux correspondants à chaque source avant corrélation.

Si les sources de bruit sont suffisamment nombreuses et réparties dans l'espace, puis en invoquant les équations (2.12) et (2.11), la dérivée temporelle de l'équation (2.16) donne :

$$\frac{dR_{AB}(t)}{dt} \simeq K\, \varphi_c(t) \otimes R_n(t) \otimes \left[G_{AB}(t) - G_{AB}(-t)\right]. \tag{2.17}$$

Le but ici est de comparer cette réponse passive obtenue au signal actif s_{AB}. En observant les équations (2.17) et (2.13), il paraît souhaitable de définir la quantité suivante :

$$D_{AB}(t) = \frac{dR_{AB}(t)}{dt} \otimes s_0(t). \tag{2.18}$$

De l'équation (2.17), D_{AB} peut être exprimé

$$D_{AB}(t) = D^{+}_{AB}(t) - D^{-}_{AB}(t), \tag{2.19}$$

Où

$$D^{+}_{AB}(t) = K\, \varphi_c(t) \otimes R_n(t) \otimes G_{AB}(t) \otimes s_0(t), \tag{2.20}$$

est le terme de D_{AB} lié à la fonction de Green causale et de même D^{-}_{AB} est le terme lié à la fonction de Green anti-causale.

Dans les expériences présentées dans la section suivante, le bruit est excité dans le milieu grâce à des transducteurs piézoélectriques du même type que ceux utilisés dans les points de mesure A et B. Dans ce cas, les réponses impulsionnelles de conversion $c_S(t)$ et $c(t)$ seront considérées identiques. Enfin, à supposer que $R_n(t)$ est proche d'une distribution de Dirac (bruit blanc) et l'introduction de l'équation (2.13) dans l'équation (2.20) donne

$$D^{+}_{AB}(t) \propto c(-t) \otimes s_{AB}(t), \tag{2.21}$$

Où $\propto$ le symbole de proportionnalité.

Cette relation signifie que à condition que le processus de transduction ait une bande de fréquence au moins aussi large que le signal d'excitation actif s_0, le signal D_{AB}^{+} obtenu par corrélation de bruit pourrait être utilisé pour estimer le signal actif s_{AB} sans le mesurer directement. Naturellement, cela exige également que le nombre de sources de bruit soit suffisant pour que le champ de bruit soit suffisamment diffus, comme indiqué ci-dessus. Ce dernier point sera étudié en détail dans la section suivante pour le cas d'un échantillon de rail.

2.4 Conditions de convergence vers la réponse active sur un échantillon de rail

Cette section présente une étude expérimentale sur la reconstruction effective de la réponse active à partir de la fonction de corrélation des champs de bruit, comme prédit théoriquement par l'équation (2.21). Les expériences sont effectuées sur un échantillon de rail de longueur 2 m dont une section transversale est représentée sur la FIGURE 2.1.

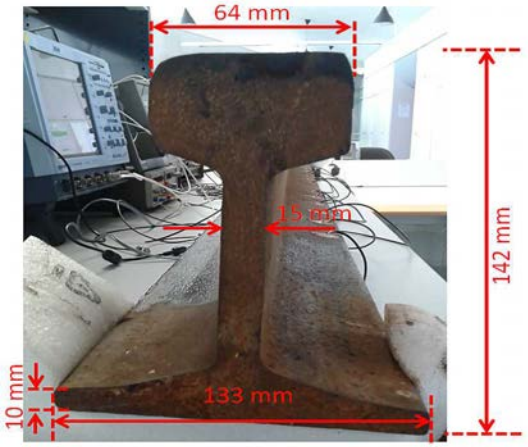


FIGURE 2.1 – Photo d'une section transversale de l'échantillon de rail utilisé dans cette étude.

2.4.1 Capteurs utilisés

Plusieurs techniques et procédés permettent de générer et/ou détecter des ondes ultrasonores, laser, électromagnétique (inductif) ou électrostatique (effet capacitif), magnétostriction, ou encore l'effet piézoélectrique qui est largement utilisé dans le domaine du contrôle santé des structures. Les transducteurs piézoélectriques présentent l'avantage de pouvoir être utilisés aussi bien en génération qu'en détection. À l'émission, l'élément piézoélectrique est mis en vibration par un signal électrique (effet piézoélectrique) ; à la réception, la vibration ultrasonore crée un champ électrique détecté sur les électrodes situées de part et d'autre de la lame PZT. La FIGURE 2.2 représente un transducteur piézo-céramique.



FIGURE 2.2 – Transducteur piézo-céramique

Dans la suite de ce travail, les capteurs piézo-céramiques de type PZ27, de diamètre ($\varnothing$) = 27 mm, épaisseur h = 0.43 mm seront utilisés en émission pour générer des ondes acoustiques dans la structure et en réception pour détecter les ondes acoustiques se propageant dans la structure inspectée. Les caractéristiques techniques de ces transducteurs sont résumées dans le tableau TABLE. 2.1.

Impédance	200 Ω
Référence	FT-27T-4.0A1-470
Alim.	30 V/AC
Capacité	25000 pF ± 30
($\varnothing$)	27 mm
Modèle	Transducteur piézo céramique sans circuit éléctronique

TABLE 2.1 – Caractéristiques techniques des transducteurs utilisés

Les capteurs piézoélectriques utilisés dans notre travail pour la génération et la détection des ondes ultra-sonores guidées dans la structure sont collés directement sur la surface de cette dernière. En effet, il est nécessaire de regarder les caractéristiques réelles de ces capteurs et l'effet du collage. À l'aide d'un analyseur d'impédance, nous avons mesuré l'impédance des transducteurs utilisés. Nous avons effectué des relevés de la résistance et de la réactance du transducteur piézo-céramique en fonction de la fréquence dans deux situations différentes : transducteur à vide et transducteur collé sur la surface du rail. Nous avons ensuite déterminé le module et la phase de l'impédance pour ces deux cas de figure.

Les FIGURES 2.3 montrent un exemple du module : (a) et de la phase : (b) de l'impédance mesurée pour un transducteur piézo-céramique dans les deux situations décrites précédemment.

Les caractéristiques obtenues pour les deux situations sont très proches dans la bande de fréquence d'utilisation (autour de 50 kHz).

L'utilisation de ces capteurs nécessite l'introduction d'un couplant (gel, miel, etc.) afin

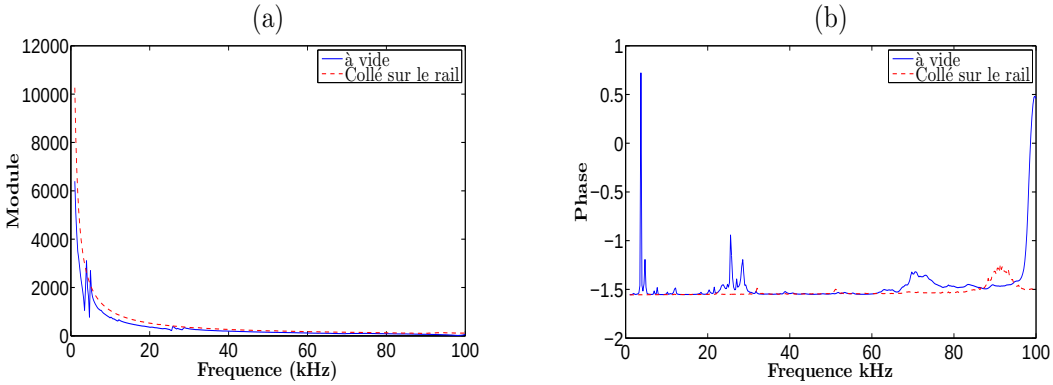


FIGURE 2.3 – Module et phase de l'impédance électrique mesurée dans un premier temps pour un transducteur à vide ensuite pour un transducteur collé sur le rail. (a) : Module, (b) : Phase

d'améliorer le couplage électromagnétique capteur-structure. L'épaisseur du couplant est difficile à contrôler et peut induire des changements d'amplitude. D'où l'intérêt d'utiliser de la colle à la place d'un gel ou du miel.

2.4.2 Mesure de la réponse active

Deux transducteurs piézoélectriques comme ceux décrits précédemment ont été collés sur le patin du rail aux points A et B. Un générateur de fonctions aléatoires est utilisé pour générer le signal d'excitation au niveau du transducteur A. Le signal reçu au niveau du transducteur B est acquit en utilisant un oscilloscope synchronisé avec le générateur de fonctions et relié à un ordinateur par une interface GPIB (FIGURE 2.4).

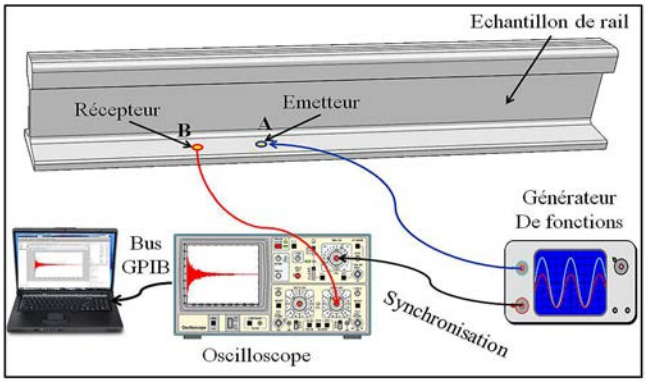


FIGURE 2.4 – Dispositif expérimental. Expérience d'émission-réception active.

L'émetteur (A) est excité avec un signal électrique $s_0(t)$ correspondant à un train d'impulsions sinusoïdales d'un cycle à 50 kHz avec une amplitude de 10 v. Le choix de cette fréquence est lié à la taille des défauts recherchés (défauts centimétriques). Les signaux mesurés sont moyennés sur 128 acquisitions afin d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR).

La FIGURE 2.5 montre un signal mesuré avec cette configuration. C'est un signal réverbéré typique qui est constitué par la propagation directe du point A au point B et un grand nombre de réflexions multiples, diffusions, conversions de mode sur les limites du domaine (bords de l'échantillon de rail) et de possibles inhomogénéités. Au delà de 80 ms, ce signal est complètement atténué.

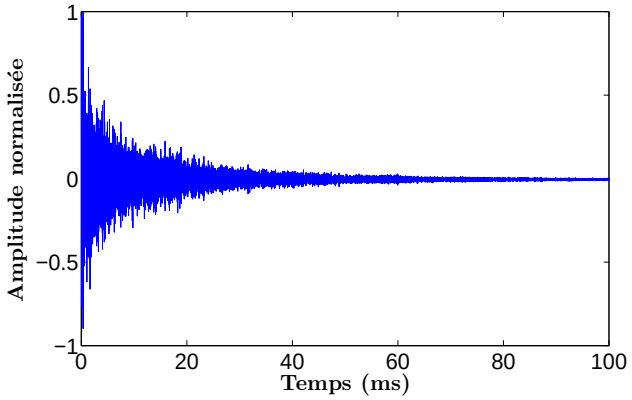


FIGURE 2.5 – Réponse typique mesurée par le récepteur au point B quand le transducteur A est excité par un train d'impulsions sinusoïdales d'un cycle à 50 kHz.

2.4.3 Mesure de l'inter-corrélation de bruit

a) Dispositif expérimental

Dans l'expérience de corrélation de bruit, le générateur de fonctions est supprimé et les deux transducteurs A et B sont utilisés comme récepteurs. Pour générer le bruit acoustique dans l'échantillon de rail, dix transducteurs piézoélectriques du même type que ceux utilisés précédemment, collés sur le patin du rail à des postions S_i sont alimentés successivement par un générateur de bruit aléatoire (FIGURE 2.6).

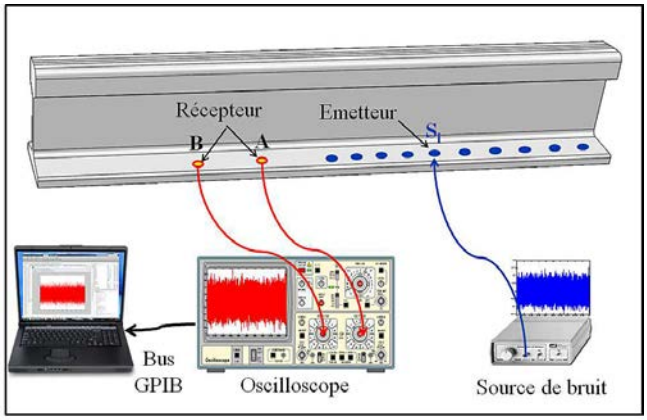


FIGURE 2.6 – Dispositif expérimental. Mesure de l'inter-corrélation de bruit.

b) Caractérisation du générateur de bruit

On a vu dans le paragraphe 2.3 que dans des conditions idéales (champs parfaitement diffus : les sources de bruit doivent être réparties uniformément dans le milieu, décorrélées les unes par rapport aux autres et émettent un bruit blanc.), la fonction de Green entre deux points du milieu peut être extraite à partir de la fonction de corrélation de bruit. Il est donc nécessaire d'analyser le signal généré par la source de bruit utilisée. En effet, nous avons fait des acquisitions de ce signal. Un exemple de durée 100 ms est montré sur la FIGURE 2.7.

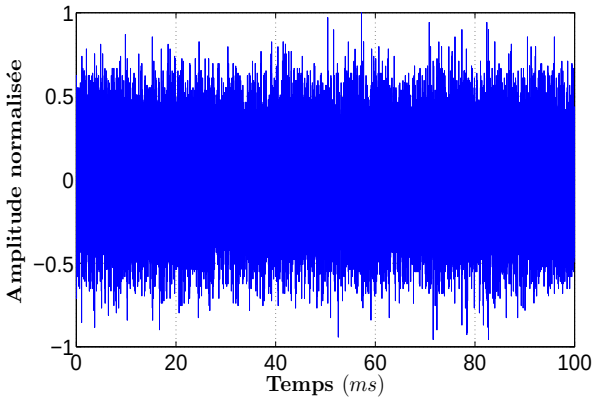


FIGURE 2.7 – Exemple de signal généré par la source de bruit utilisée de durée 100 ms.

Pour analyser ce signal, dans un premier temps, on calcule sa fonction d'auto-corrélation en faisant une estimation sur plusieurs acquisitions. Dans l'exemple présenté sur la FIGURE 2.8 la fonction d'auto-corrélation est estimée sur 10 acquisitions d'une durée de 100 ms et une fréquence d'échantillonnage $f_e = 500\ kHz$.

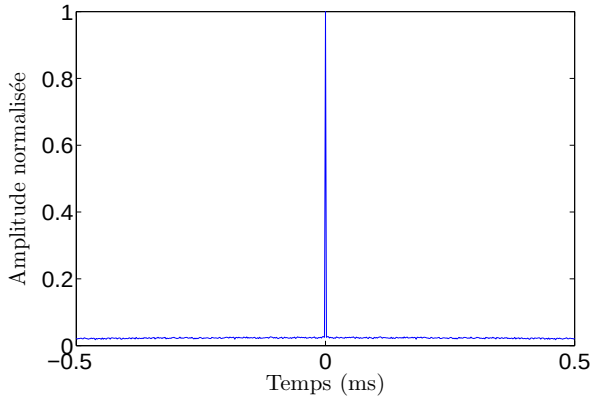


FIGURE 2.8 – Auto-corrélation du signal généré par la source de bruit utilisée. L'auto-corrélation est estimée sur 10 acquisitions d'une durée de 100 ms et une fréquence d'échantillonnage $f_e = 500\ kHz$.

On peut constater sur la FIGURE 2.8 que la fonction d'auto-corrélation estimée du signal généré tend vers un Dirac. Sa densité spectrale de puissance (DSP) est la transformée de

Fourier de sa fonction d'auto-corrélation. La DSP de ce signal est donc déterminée en utilisant l'équation (2.22)

$$S_{AA}(F) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{AB}(n) e^{-jn2\pi F} \tag{2.22}$$

La FIGURE 2.9 représente la DSP du signal généré par la source de bruit utilisée dans la gamme de fréquence 1-100 kHz. On constate clairement que cette DSP tend vers une constante dans la bande de fréquence 10-100 kHz. On peut conclure que le signal généré est un bruit blanc dans cette bande de fréquence.

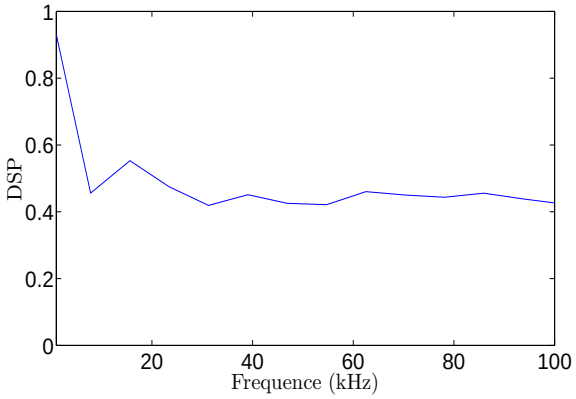


FIGURE 2.9 – Densité spectrale de puissance du signal généré par la source utilisée dans la bande de fréquence 1-100 kHz.

c) Reconstruction (estimation) de la réponse active

La fonction de corrélation de bruit R_{AB} est estimée expérimentalement à partir des corrélations à durées finies, moyennées sur un nombre d'acquisitions M. Plus précisément, un estimateur de la fonction de corrélation correspondant à chaque source est utilisé et défini comme :

$$\widetilde{R}_{AB}^{(n)}(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \int_0^T s_A^{(m,n)}(\tau)\, s_B^{(m,n)}(t+\tau)\, d\tau, \tag{2.23}$$

où T est la durée du signal enregistré et $s_X^{(m,n)}(t)$ est le signal enregistré au point X à la $m^{\text{ième}}$ acquisition des mesures effectuées lorsque la $n^{\text{ième}}$ source est active.

Ensuite, l'estimateur de corrélation globale pour le cas de N sources de bruit est simplement défini par

$$\widetilde{R}_{AB}(t) = \sum_{n=1}^{N} \widetilde{R}_{AB}^{(n)}(t). \tag{2.24}$$

Dans cette partie de l'étude, on se concentre sur l'influence du nombre d'acquisitions M et du nombre de sources N sur la convergence des fonctions de corrélations de bruit estimées vers la réponse active, en se basant sur la relation théorique donnée par l'équation (2.21).

Étant donné que la durée du signal dans la bande de fréquence considérée est d'environ 80 ms, comme observée sur la FIGURE 2.5, une durée d'acquisition $T = 100$ ms est choisie.

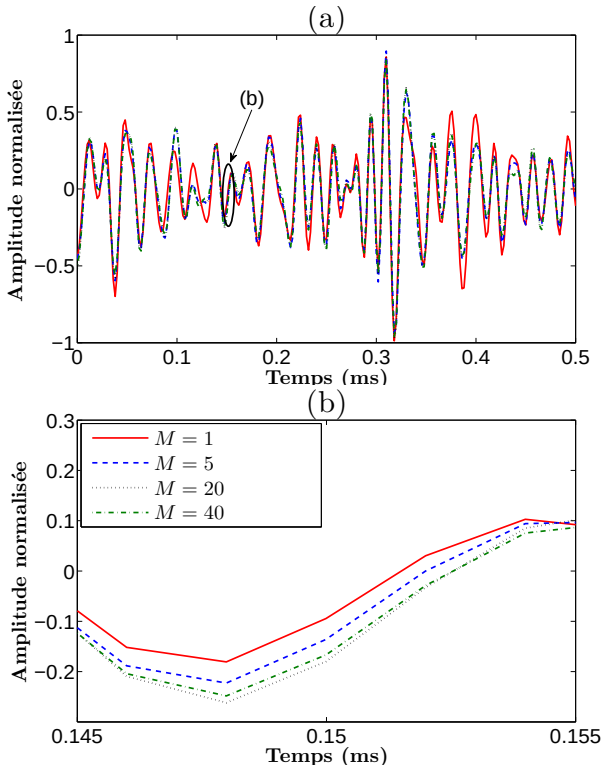


FIGURE 2.10 – Influence du nombre d'acquisitions (M) sur la fonction de corrélation estimée. (a) Les premiers paquets d'ondes de $\widetilde{R}_{AB}^{(1)}(t)$. (b) Zoom sur les formes d'onde encerclées dans (a).

La FIGURE 2.10-(a) montre les premiers paquets d'ondes de la partie positive des fonctions d'inter-corrélations estimées $\widetilde{R}_{AB}^{(1)}(t)$ obtenues avec différentes valeurs du nombre d'acquisitions M, et en utilisant une source de bruit ($N = 1$). Étant donné que les amplitudes absolues des formes d'onde présentées sont inutile ici, elles ont été systématiquement normalisées par rapport à leurs valeurs maximales. Pour une meilleure visualisation, un zoom sur une partie des formes d'onde est présenté sur la FIGURE 2.10-(b). On peut constater que la corrélation estimée commence à converger lorsque le nombre d'acquisitions est supérieure ou égale à 20. Cependant, une valeur $M = 20$ sera retenue comme un compromis satisfaisant entre la précision de l'estimation et le temps nécessaire pour la mesure et le calcul.

L'étape suivante a pour but de déterminer le nombre de positions de source pour converger vers la réponse active. En effet, comme expliqué à la section. 2.3, l'hypothèse du champ diffus est une condition nécessaire à cette convergence. La multiplication du nombre de sources réparties dans le médium aidera à se rapprocher de cette condition théorique et ainsi assurer une meilleure convergence.

Il est connu que la symétrie temporelle des fonctions de corrélation de bruit est un bon indicateur de la qualité de cette convergence. Ceci est dû au principe de réciprocité acoustique [102], qui implique que la fonction de Green obtenue lors d'une propagation d'un point A au point B est la même que celle de B à A. Par conséquent, la symétrie des fonctions de corrélation estimées $\widetilde{R}_{AB}(t)$ pour différentes valeurs du nombre de sources de bruit N sera vérifiée. À cet effet, les parties causale et anti-causale de $\widetilde{R}_{AB}$ sont comparées dans la FIGURE 2.11.

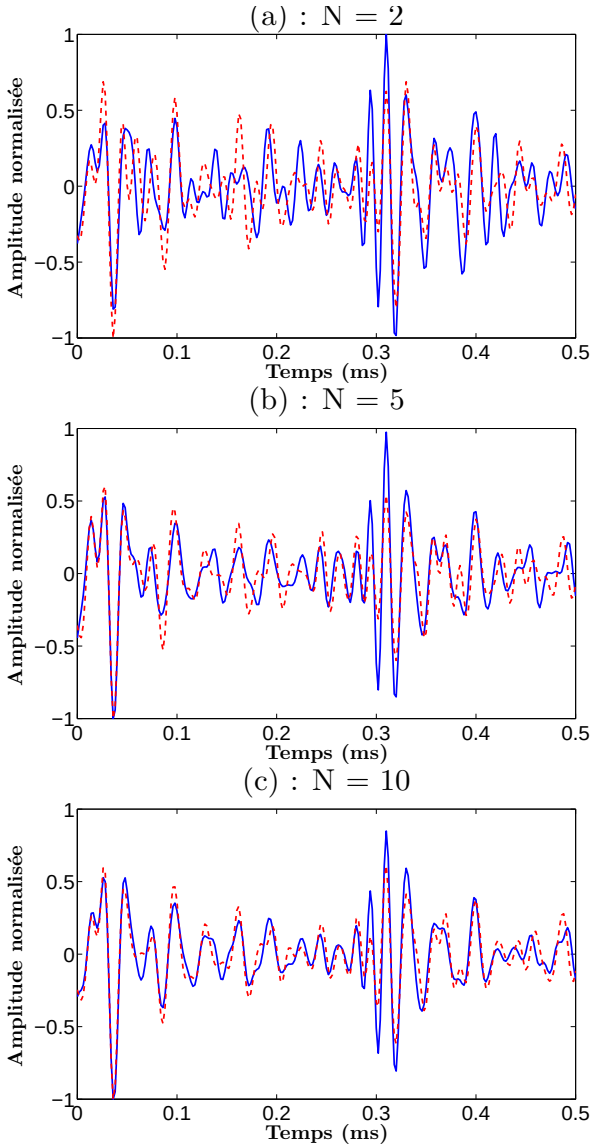


FIGURE 2.11 – Comparaison des parties causale (——) et anti-causale (– – –) de la fonction d'inter-corrélation estimée pour différentes valeurs du nombre de positions de sources : (a) $N = 2$, (b) $N = 5$, et (c) $N = 10$.

Pour $N = 2$ (FIGURE 2.11-a), il apparaît clairement que la partie causale et la partie anti-causale de la fonction d'inter-corrélation estimée présentent des différences significatives. Pour $N = 5$ (FIGURE 2.11-b), une meilleure concordance entre les deux parties du

signal est observée. Finalement pour $N = 10$ (FIGURE 2.11-c), une similitude limpide entre les deux parties est obtenue. Ainsi, dans cette configuration, la fonction d'inter-corrélation estimée satisfait le principe de réciprocité, de même que la réponse active s_{AB}. Il sera vérifié maintenant que ce cas correspond à une comparaison satisfaisante entre les deux.

D'après les équations (2.18) et (2.19), on définit naturellement

$$\widetilde{D}^{+}_{AB}(t) = \frac{d\widetilde{R}^{+}_{AB}(t)}{dt} \otimes s_0(t), \tag{2.25}$$

où s_0 est le signal d'excitation utilisé dans l'expérience active et $\widetilde{R}^{+}_{AB}$ est la partie causale de l'estimateur de corrélation.

Dans la FIGURE 2.12-(a), $\widetilde{D}^{+}_{AB}(t)$ obtenue avec 10 sources de bruit est comparée à la réponse active $s_{AB}(t)$. Là encore, les formes d'onde présentées ont été normalisées par rapport à leurs valeurs maximales. Les paquets d'ondes semblent correctement reconstruits, mais un décalage de phase est clairement observé. Ce déphasage est interprété comme l'effet de la réponse impulsionnelle (inconnue) de transduction $c(t)$ restant dans l'équation (2.21). Une compensation empirique de ce déphasage, comme montrée sur la FIGURE 2.12-(b) confirme que la réponse de corrélation de bruit $\widetilde{D}^{+}_{AB}$ constitue une très bonne estimation (ou " reconstruction ") de la réponse active. Les légères différences entre les deux réponses peuvent être interprétées comme l'erreur de reconstruction, appelée aussi " résidus de corrélation ".

Par la suite, les fonctions d'inter-corrélation seront donc estimées en utilisant N = 10 positions de source de bruit et M = 20 acquisitions pour chaque position.

2.5 Application à la détection de défaut

L'objectif de cette section est de démontrer l'applicabilité de la fonction de corrélation estimée pour la détection de défaut sur l'échantillon de rail. En effet, l'apparition d'un changement local dans le milieu va introduire des phénomènes de réflexion et de transmission dans la propagation. Ceci entraînera une modification de la réponse active entre deux points de mesure. Expérimentalement, l'observation d'une telle modification signifie la détection de défaut. La reconstruction efficace de la réponse active montrée dans la section précédente indique que la détection de défaut devrait également être obtenue en utilisant la corrélation de bruit.

2.5.1 Sensibilité à un défaut local

Le dispositif expérimental utilisé pour effectuer les mesures présentées dans cette section est le même que celui utilisé dans la section précédente (FIGURE 2.4 pour l'expérience d'émission-réception active et FIGURE 2.6 pour la mesure des inter-corrélations de bruit). Afin de permettre la répétabilité des expériences et pour ne pas endommager irréversible-

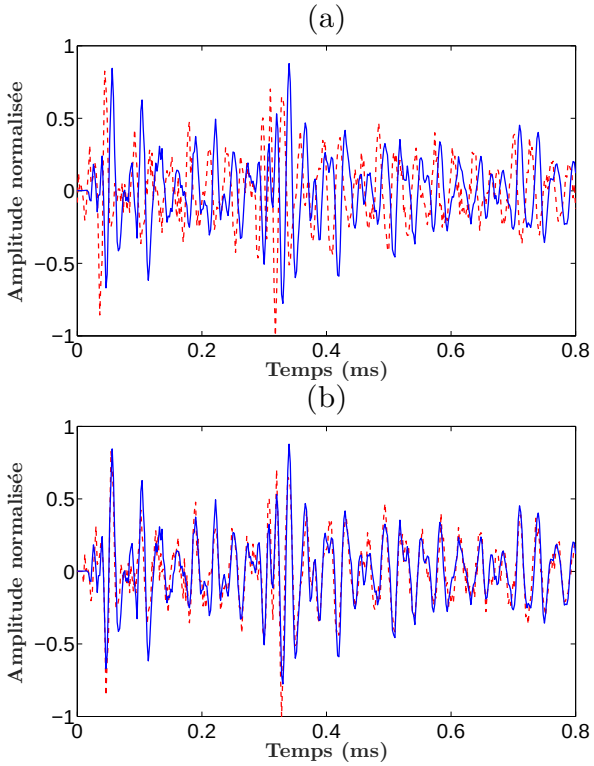


FIGURE 2.12 – Comparaison entre la réponse active mesurée $s_{AB}(t)$ (——) et $\widetilde{D}^{+}_{AB}(t)$ obtenue à partir de la corrélation de bruit estimée suivant l'équation (2.25) pour $N = 10$ sources de bruit (– – –). (a) Les formes d'onde brutes. (b) Les formes d'onde avec une compensation du déphasage.

ment l'échantillon de rail ferroviaire, nous avons utilisé un changement local. Par conséquent, ce qui sera appelé " défaut " dans la suite de ce manuscrit est une pression locale appliquée sur le patin du rail à l'aide d'une pince étau comme représenté sur la FIGURE 2.13. Une telle action mécanique induit une modification locale de la propagation des ondes guidées suffisante pour introduire des phénomènes de réflexion et de transmission comparables à l'effet d'un vrai défaut tel un trou ou une fissure. Ce défaut est placé à une distance $d = 5$ cm du point de mesure B comme l'illustre la FIGURE 2.14.

La différence des formes d'onde (connu sous le nom " *baseline subtraction* ", ou différence avec l'état de référence) est appliquée aux signaux mesurés. Ainsi, des mesures de réponse active et d'inter-corrélation de bruit sont réalisées dans un premier temps sans défaut. Les signaux obtenus constituent les formes d'onde de références $s^{\text{ref}}_{AB}(t)$ et $\widetilde{R}^{\text{ref}}_{AB}(t)$ (ou également $\widetilde{D}^{\text{ref}}_{AB}$), respectivement. Ensuite, les mêmes mesures sont effectuées en présence de défaut et les formes d'onde obtenues sont notées $s^{\text{def}}_{AB}(t)$ et $\widetilde{R}^{\text{def}}_{AB}(t)$. Enfin, les formes d'onde de références sont soustraites de celles obtenues en présence de défaut, ce qui donne

$$\Delta s_{AB}(t) = s^{\text{def}}_{AB}(t) - s^{\text{ref}}_{AB}(t), \tag{2.26}$$

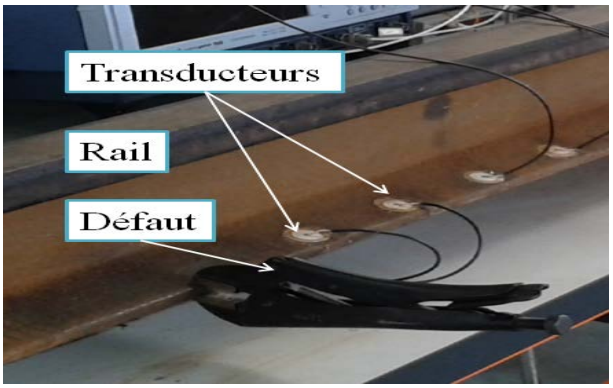


FIGURE 2.13 – Photo de la simulation d'un défaut dans l'échantillon de rail en utilisant une pince étau.

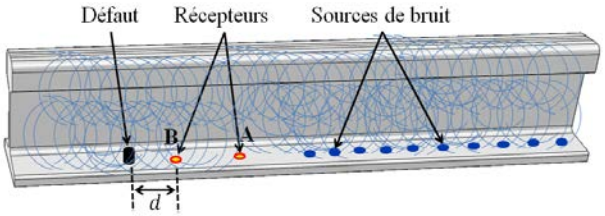


FIGURE 2.14 – Détection de défaut par inter-corrélation des champs de bruit entre deux points de mesures d'un échantillon de rail.

la réponse active différentielle, et

$$\Delta\widetilde{R}_{AB}(t) = \widetilde{R}^{\text{def}}_{AB}(t) - \widetilde{R}^{\text{ref}}_{AB}(t), \tag{2.27}$$

la corrélation de bruit différentielle (ou $\Delta\widetilde{D}_{AB} = \widetilde{D}^{\text{def}}_{AB} - \widetilde{D}^{\text{ref}}_{AB}$).

Ces formes d'onde différentielles sont représentatives de la signature du défaut. Les premiers paquets d'ondes du signal Δs_{AB}, normalisé par rapport aux valeurs maximales de s^{ref}_{AB}, sont présentés sur la FIGURE 2.15-(a). Le premier paquet (juste avant 0.1 ms) correspond à la première réflexion du défaut, tandis que les autres correspondent à des combinaisons de formes d'onde transmises ou réfléchies sur le défaut et des réflexions aux extrémités de l'échantillon de rail.

La réponse différentielle des corrélations de bruit $\Delta\widetilde{D}_{AB}$, obtenue avec les paramètres déterminés expérimentalement ($M = 20$, $N = 10$) et normalisée par rapport aux valeurs maximales de $\widetilde{R}^{\text{ref}}_{AB}$, est montrée sur la FIGURE 2.15-(b). En comparant les FIGURES 2.15-(a) et (b), des similitudes entre les deux formes d'onde sont visibles. Toutefois, des différences significatives sont également perceptibles. En particulier, un premier paquet d'ondes d'amplitude significative est apparent entre 0 et 0.08 ms dans la réponse différentielle de corrélation de bruit. Ce paquet d'ondes rend celui associé à la réflexion sur le défaut moins évident que dans la réponse différentielle active. Ceci peut être expliqué par le fait que la reconstruction des réponses actives par le processus de corrélation de bruit repose sur tous les paquets

d'ondes réverbérés. Puisque l'introduction de tout changement locale dans le milieu modifiera à la fois tous les paquets d'ondes se propageant dans ce milieu et ajoute des paquets d'ondes réfléchis, il entraînera des changements dans le processus de reconstruction lui-même. Cela signifie que dans $\Delta\widetilde{D}_{AB}$, la signature du défaut (temporairement reliée à la position de défaut, comme dans Δs_{AB}) sera mélangée avec des différences dues aux résidus de corrélation qui n'ont aucune localisation particulière dans le temps.

Bien que ceci prouve évidemment que la corrélation de bruit est clairement sensible à un changement du milieu, la difficulté de relier la réponse de corrélation de bruit différentielle à la position pourrait être un problème. La nécessité de distinguer un défaut local d'un changement dans les conditions de frontière aux extrémités de l'échantillon de rail ou une variation matérielle globale telle que celle induite par des changements de température ou d'autres effets pourrait être cruciale dans une situation réaliste. Par conséquent, il est important de pouvoir extraire des informations cohérentes liées à la position du défaut. À cet effet, nous proposons dans la prochaine section une expérience originale basée sur plusieurs acquisitions où de multiples distances défaut-transducteur sont considérées.

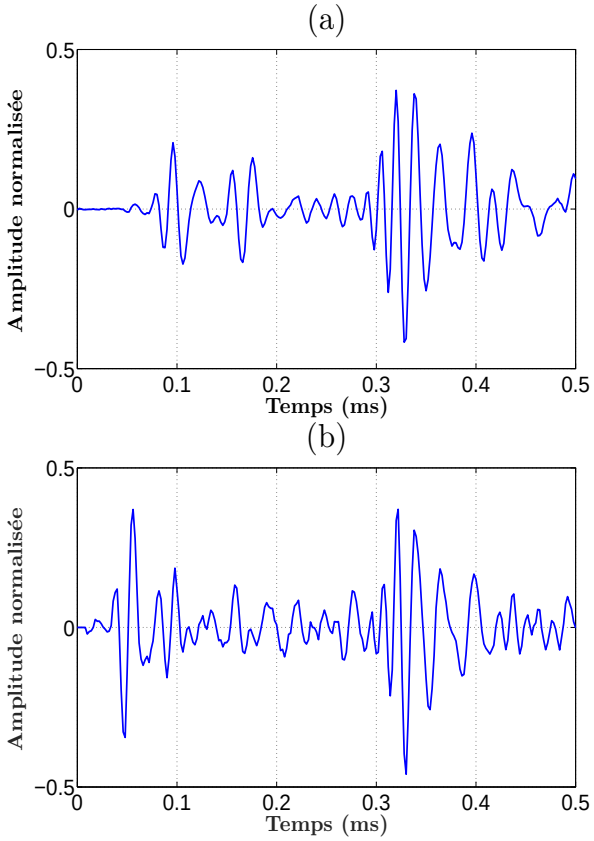


FIGURE 2.15 – Sensibilité à un défaut : (a) Détection par émission-réception active $\Delta s_{AB}(t)$. (b) Détection par corrélation de bruit $\Delta\widetilde{D}^{+}_{AB}(t)$.

2.5.2 Extraction des informations cohérentes

Une façon plutôt naturelle de présenter des informations relatives à la position d'une source ou d'un diffuseur est d'interroger plusieurs distances de propagation. Par conséquent, le même type de mesures que dans le paragraphe précédent seront réalisées ici, mais en faisant varier les distances de défauts-transducteur. Pour des raisons pratiques, au lieu de déplacer les transducteurs ou d'en utiliser plusieurs à différentes positions (comme ce serait logique dans une situation SHM réelle), nous allons déplacer le " défaut local " constitué par la pression de la pince étau.

Les transducteurs utilisés ici sont les mêmes que ceux utilisés précédemment (A et B) et les paramètres utilisés pour le processus de corrélation de bruit sont maintenus inchangés ($N = 10$ positions de source, $M = 20$ acquisitions par source). Un ensemble de signaux actifs et des réponses de corrélation pour 24 positions de défauts sont enregistrés. Les positions sont définies par $d_i = d + (i-1)\Delta x$, où d_i est la $i^{\text{ième}}$ distance entre le défaut et le transducteur B (voir FIGURE 2.16). La distance initiale d est de 5 cm et le pas de déplacement Δx est de 1 cm.

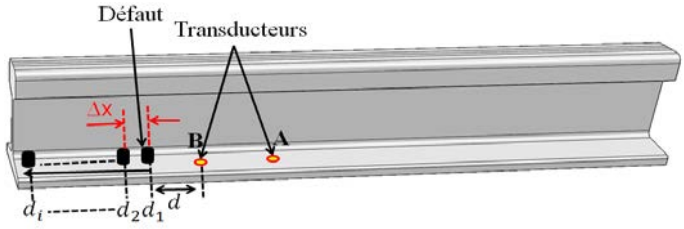


FIGURE 2.16 – Description de l'expérience avec plusieurs distances défauts-transducteur.

Par soustraction, ici encore, le signal de référence et réponse de corrélation sans défaut correspondants aux nouvelles formes d'onde enregistrées, 24 réponses actives différentielles $\Delta s_{AB}^{\text{def},i}(t)$ et 24 réponses différentielles de corrélation de bruit $\Delta \widetilde{R}_{AB}^{\text{def},i}(t)$ sont obtenues. L'exposant i indique l'indice de position du défaut. Ces formes d'onde sont présentées sur les FIGURES 2.17-(a) et (b), respectivement, sous forme d'information spatio-temporelle. L'interprétation de la FIGURE 2.17-(a) est simple : le premier paquet d'ondes correspondant à la réflexion du défaut a un temps de propagation proportionnel à la distance d_i, qui se manifeste par une pente nette (entre approximativement 0.1 ms à 5 cm et 0.25 ms à 29 cm) sur l'image spatio-temporelle.

La FIGURE 2.17-(b) est visiblement plus bruitée. Le premier paquet d'ondes (avant 0.05 ms) ne se propage pas et, bien qu'il soit évidemment lié à la présence du défaut, il est indépendant de sa position. Cela confirme la remarque faite précédemment à propos de la FIGURE 2.15-(b). Une composante de propagation est également visible, mais pas très nette comparée à la pente observée dans l'image obtenue avec les réponses différentielles actives. Nous précisons que nous avons ici présenté $\Delta \widetilde{R}_{AB}$ directement et pas la version dérivée et convoluée $\Delta \widetilde{D}_{AB}$, qui est uniquement utile pour une comparaison quantitative précise avec les réponses actives. Pour l'identification de la composante propagative, $\Delta \widetilde{R}_{AB}$ est aussi approprié que $\Delta \widetilde{D}_{AB}$.

Afin de mettre en évidence cette composante propagative liée à la première réflexion sur

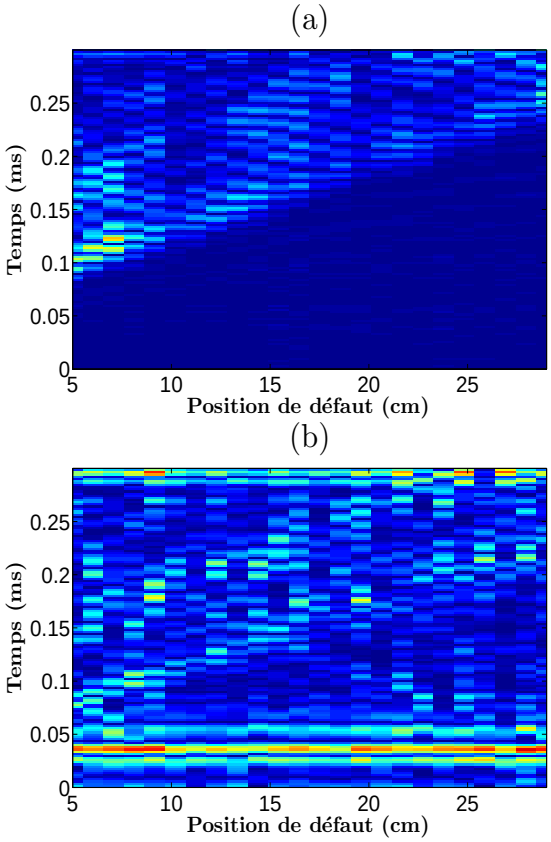


FIGURE 2.17 – Représentations spatio-temporelles en fonction des positions du défaut : (a) Réponses actives différentielles $\Delta s_{AB}(t)$, (b) : Réponses différentielles de corrélations de bruit estimées $\Delta\widetilde{R}_{AB}(t)$ avec$M = 20$ et $N = 10$.

le défaut, nous avons appliqué une transformation de Fourier (FT-2D) à deux dimensions (spatio-temporelle) aux réponses différentielles obtenues. Cela conduit à une représentation dans le domaine fréquence-nombre d'onde qui peut être directement comparée aux courbes de dispersion des ondes élastiques guidées dans le rail.

La FIGURE 2.18-(a) montre la 2D-FT des réponses différentielles actives. Les courbes de dispersion, calculées en utilisant la technique SAFE (Semi-Analytical Finite Element) [103], ont été superposées pour faciliter l'interprétation de l'image fréquence- nombre d'onde. La composante propagative la plus apparente (correspondant à la pente visible sur la FIGURE 2.17-(a) et commentée ci-dessus) semble correspondre au mode guidé du nombre d'onde le plus élevé. Logiquement, ce mode se trouve être essentiellement concentré dans le patin du rail, où se trouvent les transducteurs et le défaut.

Le même type d'interprétation peut être fait pour la FIGURE 2.18-(b), où l'image 2D-FT des réponses différentielles obtenues avec corrélation de bruit comparée aux mêmes courbes de dispersion. Premièrement, on peut noter que des tâches de forte amplitude sont présentes autour du nombre d'onde zéro. Cela correspond à des éléments non propagatifs résultants des résidus de corrélation tel que discuté précédemment. Toutefois, la composante propagative en rapport avec le même mode guidé que dans l'expérience active est également clairement

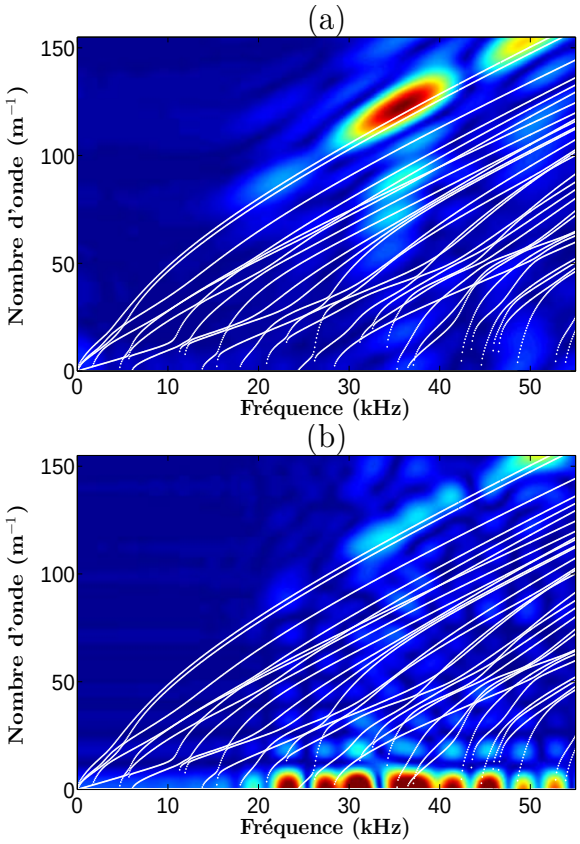


FIGURE 2.18 – Transformées de Fourier à deux dimension (2D-FT) et comparaisons aux courbes de dispersion numériques du rail. (a)2D-FT de Δs_{AB}. (b) 2D-FT de $\Delta \widetilde{R}_{AB}$.

visible.

Cette étude confirme que le processus d'interaction ondes-défaut, habituellement exposé en générant activement des ondes incidentes, se manifeste de la même manière dans les mesures de bruit de corrélation. Cela signifie en particulier que les informations relatives aux distances défaut-capteur (et par conséquent la position de défaut) sont effectivement présentes et éventuellement extractibles d'un bruit ambiant.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons, dans un premier temps, rappelé des généralités sur la fonction de corrélation et l'estimateur de corrélation. Les bases théoriques sur la reconstruction passive de la réponse active sont illustrées suivant les références bibliographiques consultées.

Dans un second temps, nous avons présenté une étude expérimentale préliminaire sur l'application des techniques de corrélation de bruit pour la reconstruction de la réponse active entre deux récepteurs acoustiques placés sur un échantillon de rail. En faisant une comparaison entre une expérience d'émission-réception active et une expérience de corrélation

de bruit, nous avons démontré qu'une bonne qualité de reconstruction de la réponse active peut être atteinte, à condition que le nombre d'acquisitions et le nombre de sources de bruit distribuées soient suffisants. Puis, la différence des formes d'onde entre l'état de référence et l'état avec défaut (baseline subtraction) nous a permis d'isoler l'effet d'un défaut local sur les fonctions de corrélation de bruit estimées. Il est montré que cet effet consiste en une première composante relative à la position du défaut et une seconde correspondant à la différence des erreurs de reconstruction entre les états avec et sans défaut. L'utilisation de plusieurs distances transducteurs-défaut nous a permis de discriminer la première contribution sous forme d'une composante propagative, dont les caractéristiques correspondent à un mode d'onde guidée concentré dans le pied de rail, où se trouvent le défaut.

Ces premiers résultats encourageants confirment la tendance vers des systèmes passifs pour la surveillance des infrastructures ferroviaires. En effet, dans le domaine ferroviaire, quand un train est en mouvement, les interactions mécaniques dynamiques entre le rail et les roues du train génèrent naturellement des ondes élastiques guidées dans le rail. Cette technique pourrait donc offrir la possibilité d'un suivi en temps réel, avec un dispositif moins intrusif et une consommation d'énergie du système minimisée.

Le système étudié dans ce chapitre est basé sur des capteurs filaires. L'évolution naturelle d'un tel système serait d'aboutir à une situation où les capteurs pourraient fonctionner sans fil. Dans le chapitre trois, on se propose d'étudier la modélisation d'une plateforme de communication sans fil dédiée au CSI des structures.

CHAPITRE 3

Étude et modélisation d'une plateforme de communication pour les WSN

Sommaire

3.1 Introduction 56
3.2 Description de la plateforme de communication pour les WSNs dédiée au CSI de l'infrastructure ferroviaire 58
3.2.1 Spécification des besoins 59
3.2.2 Topologie du réseau 60
3.2.3 Analyse préliminaire du système 61
3.3 Choix de la technologie de communication sans fil 63
3.3.1 Technologies potentiellement intéressantes pour les WSNs 64
3.3.2 La technologie IEEE 802.15.4/ZigBee 67
3.4 Caractérisation du canal de propagation et portée radio 71
3.4.1 Modèles de propagation radio-fréquence 72
3.4.2 Dispositif expérimental 74
3.4.3 Mesure de l'atténuation du canal 77
3.5 Résultats de mesures, discussion et comparaison aux modèles théoriques 80
3.5.1 Résultats des scénarios indoor 81
3.5.2 Résultats obtenus pour les scénarios outdoor, stade et voie ferroviaire : 85
3.6 Conclusion 86

3.1 Introduction

Durant ces dernières années, de nombreuses applications d'analyse structurelles couvrant de larges domaines ont été rapportées dans la littérature. Dans le domaine du contrôle-santé structurel, ces applications sont utilisées pour calibrer les modèles analytiques, fournir

une meilleure compréhension du comportement des structures ou pour effectuer une détection d'endommagement. Récemment, des développements significatifs de matériel ont également eu lieu pour des fins de contrôle structurel. Les capteurs conventionnels utilisés pour ces applications, voir la FIGURE 3.1, impliquent un câblage significatif (câbles de fibre optique ou autre support de transmission physique) et des systèmes centralisés d'acquisition de données avec des connexions distantes.

Malgré les avantages de ces systèmes conventionnels, le futur de la surveillance structurelle est évidemment basé sur le développement des technologies de communications sans fil basses consommation et des MEMS [1](Microelectromechanical systems).

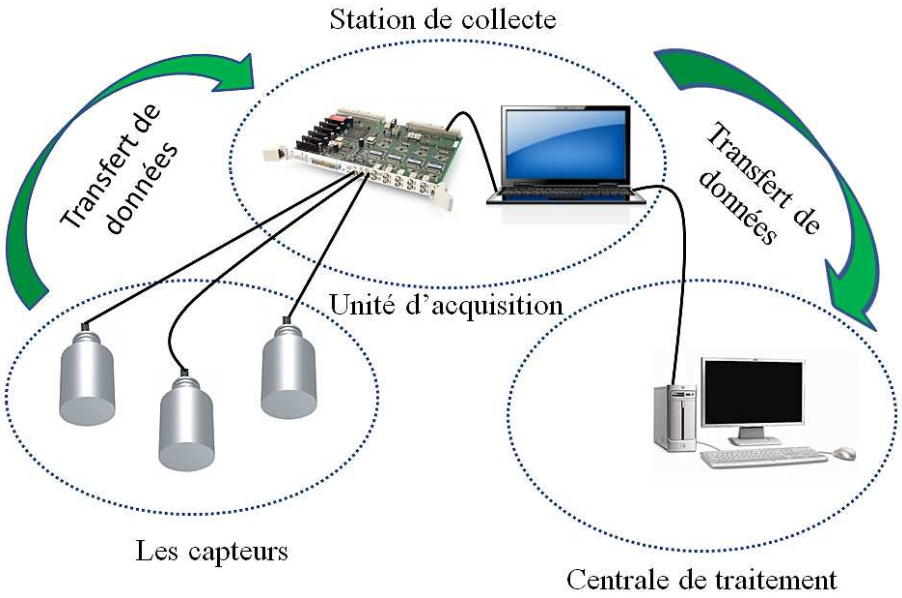


FIGURE 3.1 – Système de surveillance-santé typique basé sur des équipements filaires.

Un système de surveillance basé sur la technologie sans fil avec des dispositifs de captage embarqués peut être composé de trois parties :

1. Des unités de mesure ;
2. Une station de base ;
3. Un système de connexion à distance.

Les unités de mesure sont formées par les capteurs de mesure (MEMs par exemple) et les plateformes d'acquisition de données autonomes qui collectent les informations et les envoient sans fil à une station de base. La station de base est formée par une plateforme d'acquisition de données couplée à une carte d'interface en charge du transfert d'informations vers un ordinateur local. La troisième partie du système est un système de connexion à distance

1. Microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur ou d'actionneur, avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques.

en charge du transfert des données à partir de l'ordinateur local vers une station "cerveau" central. La FIGURE 3.2 donne une vision générale d'un système de surveillance sans fil en fonction.

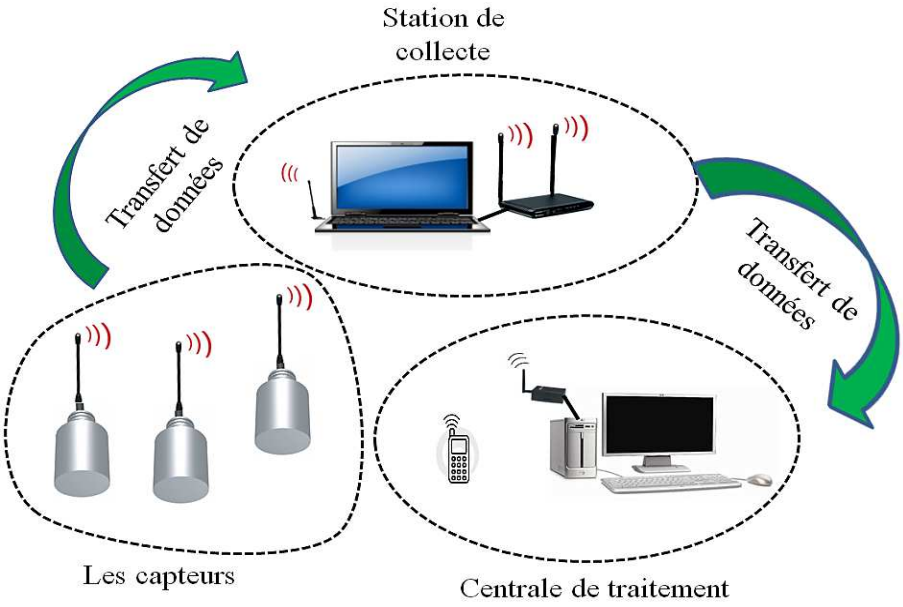


FIGURE 3.2 – Vision générale d'un système de surveillance-santé structurel sans fil.

Dans ce chapitre, nous verrons l'étude de l'architecture réseau, le choix de technologie et la norme de communication pour répondre aux contraintes des WSNs exposées dans le premier chapitre et aux exigences de l'environnement ferroviaire et plus spécifiquement aux besoins d'une application de contrôle-santé structurel dont le principe de détection est présenté dans le chapitre précédent.

3.2 Description de la plateforme de communication pour les WSNs dédiée au CSI de l'infrastructure ferroviaire

Dans l'optique de concevoir une plateforme de communication pour les réseaux de capteurs sans fil dédiée au CSI des structures, nous nous baserons sur les besoins d'une telle application. Le but principal est de mettre au point un réseau de capteurs sans fil pour la surveillance-santé des infrastructures ferroviaires. Plus précisément, il s'agit de concevoir un système autonome multi-capteurs d'acquisition et de traitement communicant à travers un réseau sans fil pour la mesure embarquée, adapté aux contraintes du milieu ferroviaire.

3.2.1 Spécification des besoins

Pour développer une quelconque application, il est primordial d'identifier les besoins des utilisateurs dès le départ. En effet, cette étape de spécification consiste à effectuer une analyse détaillée des besoins et exigences nécessaires pour la mise en œuvre de l'architecture à concevoir.

Pour notre application, les résultats de recherche sur la physique du problème ont permis de mettre au point des algorithmes de détection des endommagements basés sur les techniques acoustiques passives décrites dans le chapitre précédent. Le principe de mesure a démontré sa validité en laboratoire sur un échantillon de rail de 2 m de longueur, à partir d'un petit nombre de capteurs filaires classiques reliés à un dispositif d'acquisition standard (oscilloscope, interface GPIB).

L'évolution de ce système est d'aboutir à une situation où les capteurs pourraient fonctionner de façon autonome et sans fil, et seraient de plus les moins intrusifs possibles pour la structure surveillée. La conception de ce réseau de capteurs s'appuiera sur des technologies de communication radio-fréquence basse consommation, qui permettent le transfert de données de façon robuste, faible consommation et bas coût. Le déport d'information nécessite en effet de s'appuyer sur un réseau connexe capable de transmettre jusqu'à une balise centrale les données mesurées. Dans ce contexte, la solution choisie doit répondre aux deux enjeux majeurs que sont la réduction de la consommation d'énergie et la miniaturisation du capteur en assurant une qualité de transmission satisfaisante (fiabilité, hiérarchisation des communications). Chaque capteur intégrera la chaîne complète, de la mesure des grandeurs acoustiques locales par l'intermédiaire d'éléments piézoélectriques de petites dimensions (pastilles), à l'interface de communication radio-fréquence, en passant par des circuits de pré-traitement.

Les besoins sont donc nombreux et nous avons identifié les éléments suivants :

- Disposer les capteurs dans les zones à surveiller et les placer de manière à avoir le maximum du signal ;
- Définir les pré-traitements nécessaires pour adapter les signaux entre les capteurs et les modules de transmission ;
- Définir la pile des protocoles de communication et leur implémentation ;
- Assurer la communication entre les différents éléments du réseau (coordinateur, routeurs, nœuds capteurs) ;
- Établir une architecture simple, flexible et économe en énergie ;
- Proposer des mécanismes pour réduire la consommation d'énergie du système ;
- Garantir une synchronisation entre les différents nœuds du réseau.

Tous ces éléments doivent être pris en compte dans l'architecture globale du système, soit comme des mécanismes intégrés dans la pile de communication, ou en tant que protocoles définis pour effectuer une tâche spécifique.

3.2.2 Topologie du réseau

Nous rappelons que notre système sans fil pour le contrôle-santé des infrastructures ferroviaires est constitué de deux types d'éléments de réseau inter-connectés comme illustré sur la FIGURE 3.3.

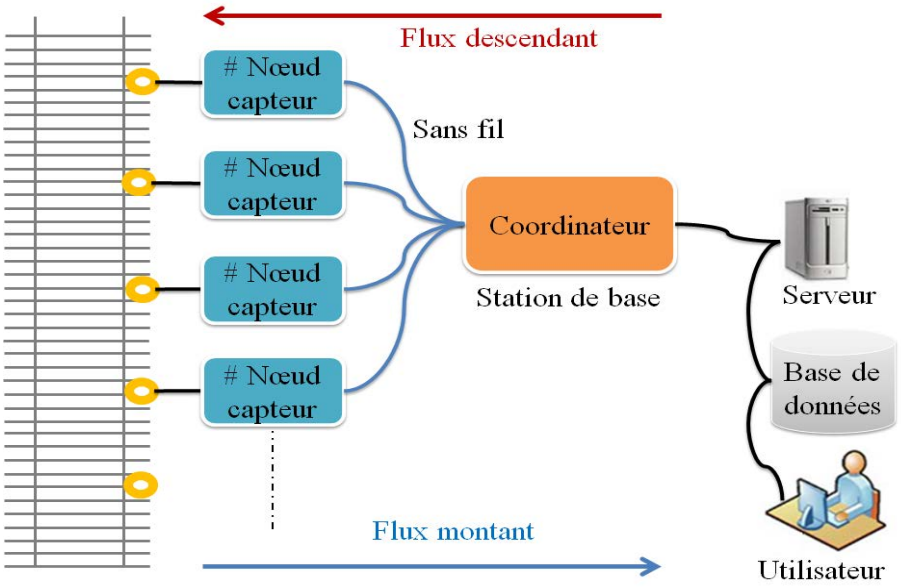


FIGURE 3.3 – Topologie du WSN pour la surveillance-santé des infrastructures ferroviaires. Les dispositifs de captage sont montés sur les nœuds capteurs attachés à l'objet surveillé. Des exemples d'infrastructures incluent les voies ferrés, les ponts et les tunnels ferroviaires.

COORDINATEUR : C'est l'élément qui fait le lien entre notre plateforme de communication et l'utilisateur. Il initie le réseau et permet aux autres dispositifs de se joindre à son réseau. Il concentre et distribue les communications de données, connait l'intégralité du réseau et le commande. Il est également en charge de la gestion du réseau ;

NŒUD CAPTEUR : Il contient la chaine d'acquisition de données depuis les capteurs, il inclut généralement un ou plusieurs éléments de captage.

Concernant les flux de communication, nous allons considérer deux types de flux, illustrés dans la FIGURE 3.3 :

LE FLUX DESCENDANT : Correspond à toutes les données/commandes qui sont émises par le coordinateur à destination d'un ou plusieurs nœuds capteurs ;

LE FLUX MONTANT : Correspond à toutes les données qui sont émises par les nœuds à destination du coordinateur.

3.2.3 Analyse préliminaire du système

Notre plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures ferroviaires est un réseau " fixe " pour lequel le nombre de capteurs est connu. La première étape d'analyse permet d'identifier les principaux besoins opérationnels et fonctionnels du système. Cette étape d'analyse consiste à identifier les acteurs du système ainsi qu'à spécifier les différents cas d'utilisation. L'objectif ici est donc de décrire les fonctions détaillées de notre système avec des diagrammes de cas d'utilisation. Cette étape permet de décrire sous la forme d'actions et de réactions le comportement de notre système, d'un point de vue utilisateur. Elle apporte une solution au problème de détermination et de compréhension des besoins.

Ainsi les acteurs qui interviennent dans notre système, comme illustré sur la FIGURE 3.4 sont :

- LE NŒUD CAPTEUR : Élément communicant sans fil situé en bout du réseau, relié à l'unité de captage. Il peut communiquer avec le coordinateur directement s'il est à sa portée ou par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres nœud capteur qui vont jouer le rôle des relais ;
- LE COORDINATEUR : Élément communicant sans fil vers les autres éléments du réseau. Il est chargé de gérer le réseau, collecter les données et de faire le lien entre le réseau de capteurs et l'application de l'utilisateur.



FIGURE 3.4 – Identification des acteurs du système.

Il est à noter que la topologie du réseau est fixe, étant donné que les éléments du réseau ne se déplacent pas les uns par rapport aux autres. Le flux descendant défini auparavant correspond au transfert des commandes depuis le coordinateur vers les nœuds et que le flux montant correspond au transfert des données depuis les nœuds vers le coordinateur. On constate aussi que le réseau est basé sur un élément centrale (coordinateur) qui communique avec des dispositifs du réseau (nœuds capteurs). Les nœuds capteurs ont aussi des capacités pour relayer les informations aux nœuds distants.

Après avoir rappelé ces points, nous allons maintenant définir les cas d'utilisation du système. Nous nous baserons sur les acteurs intervenant dans le réseau pour définir les cas d'utilisation.

a) Diagramme de cas d'utilisation relatif au coordinateur

La FIGURE 3.5 représente le diagramme de cas d'utilisation correspondant au coordinateur. Ils illustre les tâches réalisées par ce dernier. Les actions effectuées par le coordinateur

sont :

- **Initiation, configuration du réseau :** Initiation du réseau, distribution des commandes à l'ensemble du réseau pour adopter la configuration choisie ;
- **Envoi des requêtes Eveil/Sommeil :** Envoi des commandes de réveil et de mise en état de sommeil des différents éléments du réseau (nœuds capteurs) pour des fins d'économie d'énergie.
- **Envoi des signaux de synchronisation :** Distribution d'un signal de synchronisation à l'ensemble des nœuds du réseau ;
- **Commande de prélèvement des données :** Distribution d'une requête de prélèvement des données à l'ensemble des nœuds capteurs du réseau ;
- **Récupération des données :** Récupération des données prélevées par les différents capteurs.

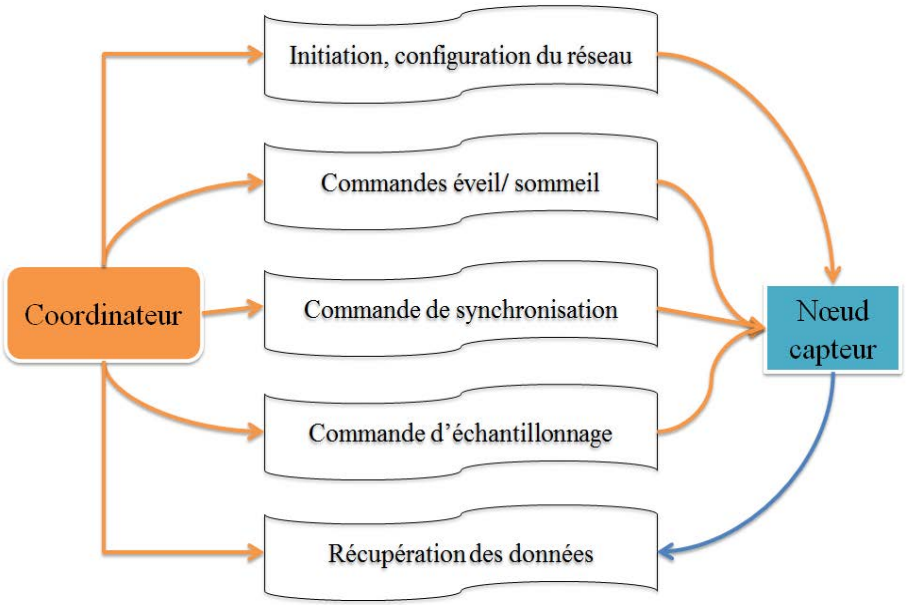


FIGURE 3.5 – Diagramme de cas d'utilisation relatif au coordinateur.

b) Diagramme de cas d'utilisation relatif au nœud capteur

La FIGURE 3.6 représente le diagramme des cas d'utilisation relatifs au Nœud capteur. Il illustre les actions réalisées par ce dernier. Nous donnons ici une description de ces cas d'utilisation :

- **Convertir le signal mécanique en signal électrique :** Délivre un signal électrique (tension) proportionnel à la grandeur physique mesurée (vibration) ;
- **Adapter le signal :** Adapter la dynamique du signal prélevé au convertisseur Analogique/Numérique ;
- **Adapter le gain :** Adapter le niveau du signal analogique afin d'obtenir une dynamique de pleine échelle maximale sans effet de saturation ;

- **Adapter offset :** Compenser les décalages des éléments sensibles ou de l'électronique afin d'obtenir une dynamique de pleine échelle maximale ;
- **Limiter bande passante :** Filtrage repliement de spectre du signal analogique avant la conversion numérique ;
- **Convertir signal :** Convertir le signal analogique en signal numérique codé sur 12 bits ;
- **Échantillonner :** Échantillonnage-blocage du signal analogique et conversion A/D (Analogique/Digital) ;
- **Stocker :** Stocker temporairement les données numérisées ;
- **Envoie des données en série :** Mettre en série les données numériques pour être transmises sur un lien radio ;
- **Adapter pour émission/réception :** Paramétrer l'interface radio fréquence-signal en bande de base suivant le lien radio sollicité ;
- **Envoyer les trames :** Envoi des trames vers le coordinateur directement quand il est à la portée du nœud capteur ou bien par l'intermédiaire d'un nœud relais ;
- **Gérer alimentation :** Délivrer des tensions stable et régulée à l'électronique du nœud et détecter d'éventuelles anomalies sur les alimentations.

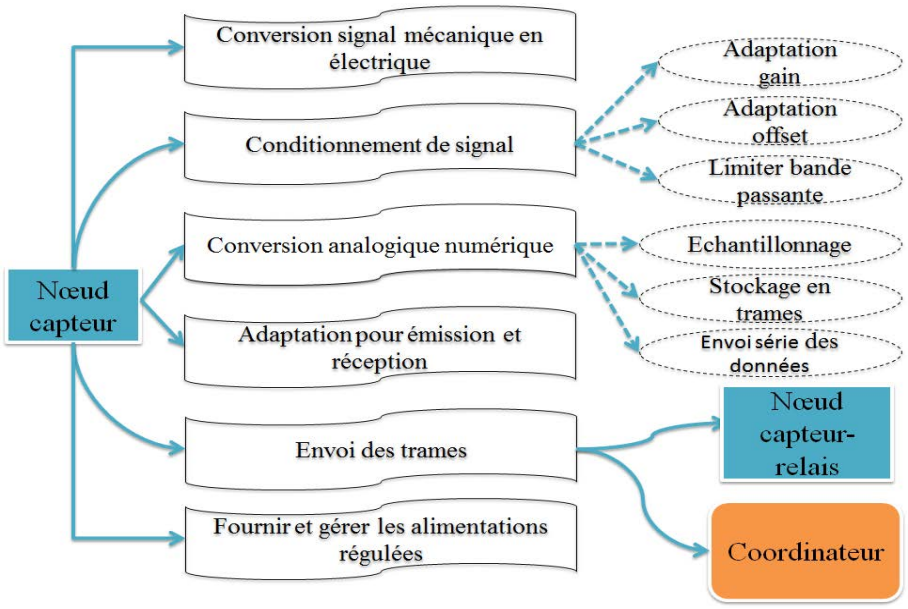


FIGURE 3.6 – Diagramme de cas d'utilisation relatif au nœud capteur.

3.3 Choix de la technologie de communication sans fil

Dans cette section, nous nous proposons de présenter les normes de communications existantes, qui pourront être potentiellement utilisées dans des réseaux de capteurs sans fil. Ces technologies sont comparées et leurs avantages et inconvénients sont soulignés. Par la

suite, en se basant sur cette comparaison, nous choisissons la technologie qui répond à nos besoins d'application en terme de débit, basse consommation, robustesse et flexibilité.

3.3.1 Technologies potentiellement intéressantes pour les WSNs

Après avoir spécifié les besoins, nous avons décrit les cas d'utilisation et vu un certain nombre de concepts que nous utiliserons dans le développement de notre application, nous nous proposons de présenter dans la suite du chapitre les normes de communications existantes, qui pourront être potentiellement utilisées dans des applications de WSNs.

Commençons par la technologie RFID [2]. Cette technologie utilise des ondes électromagnétiques dans les gammes de fréquence micro-ondes. Cela correspond à la bande de fréquence [30 kHz - 30 GHz]. Dans le tableau 3.1, sont données les différentes fréquences allouées à la RFID. Un système RFID est composé essentiellement de trois entités : un lecteur, un ou plusieurs tags et une station de base. Il existe trois types tags RFID :

- **tag passif :** Dans ce cas de figure, pour transmettre une information au lecteur, le tag utilise l'énergie (l'onde) fournie par le lecteur pour communiquer,
- **tag semi-passif :** Lorsque le tag est alimenté par une batterie et sa communication dépend de l'énergie fournie par le lecteur, on parle de tag semi-passif ;
- **tag actif :** Un tag actif est doté d'un module radio lui permettant de communiquer avec le lecteur formant un système de transmission à part entière.

Bande	Fréquence	Fréquences allouées
LF (Low Frequency)	30 kHz à 300 kHz	125 kHz, 133 kHz
HF (High Frequency)	3 MHz à 30 MHz	13.56 MHz
UHF (Ultra High Frequency)	300 MHz à 3 GHz	433 MHz, 860-960 MHz, 2.45 MHz
SHF (Super High Frequency)	3 GHz à 30 GHz	5.8 GHz

TABLE 3.1 – Bandes de fréquence et fréquences allouées à la technologie RFID

Pour les fréquences LF et HF, l'onde est moins influencée par les matériaux tels que le métal et le liquide. En RFID, cette bande de fréquence est utilisée pour le contrôle d'accès, l'identification et la traçabilité, le contrôle des stocks, les systèmes d'antivol et les cartes à puces sans contact. Un inconvénient majeur dans cette bande de fréquence est que la lecture des tags est possible uniquement lorsque la distance tag-lecteur est inférieure à 45 cm pour LF et 1 m pour HF, et on ne peut lire qu'un tag à la fois. Cette portée peut atteindre 13 m en UHF avec des tags passifs et < 100 m pour des tags actif. En hautes fréquences (UHF et SHF) il est possible de lire plusieurs tags à la fois. En RFID, ces fréquences (UHF, SHF) sont utilisées pour la traçabilité, le péage autoroutier et géolocalisation en temps réel. Deux types de couplages sont possibles : couplage inductif(FIGURE 3.8.a) pour les systèmes courtes distances et radiatif (FIGURE 3.8.b) pour les systèmes long distances.

2. Radio Frequency IDentification

La technologie RFID passive et semi-passive présentent donc un inconvénient de portée et de durée de lecture et la technologie active peut augmenter cette portée et réduire la durée de lecture. Un système RFID actif est un système de transmission-réception à part entière, consomme plus d'énergie et plus couteux. Le principe de fonctionnement d'un système RFID est décrit sur la FIGURE 3.7. Cette technologie peut être utilisée dans le cas des réseaux de capteurs sans fil où les données à transmettre ne sont pas volumineuses et ne présentent pas de contraintes temporelles comme la mesure de température, pression atmosphérique ou l'humidité.

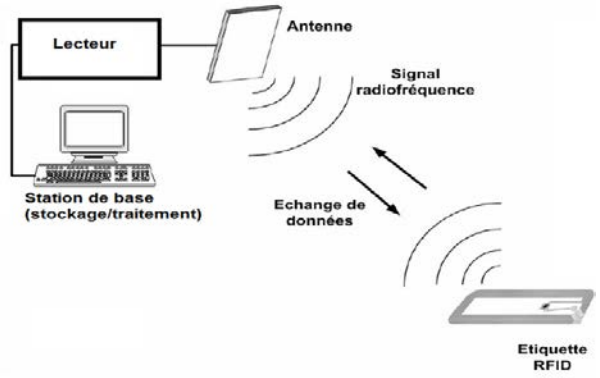


FIGURE 3.7 – Schéma de principe d'un système RFID.

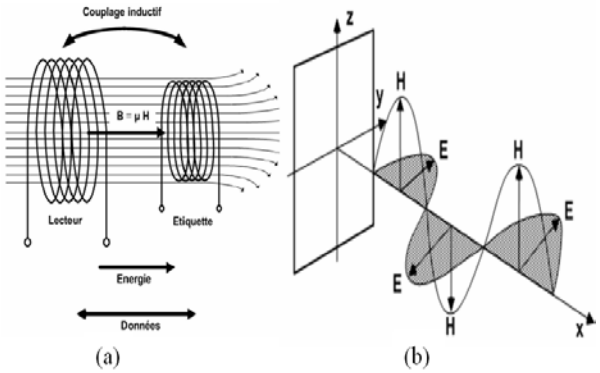


FIGURE 3.8 – Types de couplage pour les systèmes RFID.

La norme IEEE 802.15.4 [1], qui utilise le principe de communication CSMA/CA et qui a l'avantage d'une faible consommation d'énergie. Parfois, cette norme est confondue avec la technologie ZigBee [3], qui est une norme utilisant les services offerts par l'IEEE 802.15.4. Ce qu'apporte en plus ZigBee est une restructuration du réseau (en étoile, en réseau maillé, en réseaux "cluster-tree"), ainsi que des services de sécurité, de niveau applicatif, etc.

Les applications visées par l' IEEE 802.15.4 sont du domaine des réseaux de capteurs sans fil, la domotique, les réseaux domestiques, des dispositifs de connexion à un PC, la sécurité, etc. Ainsi, une nouvelle catégorie de réseaux est née (FIGURE 3.9), le LR-WPAN

3. http ://www.zgbee.org/.

(Low Rate - Wireless Personal Area Network), qui est caractérisée par un faible débit et une faible consommation d'énergie, avec des topologies pair à pair ou en étoile.

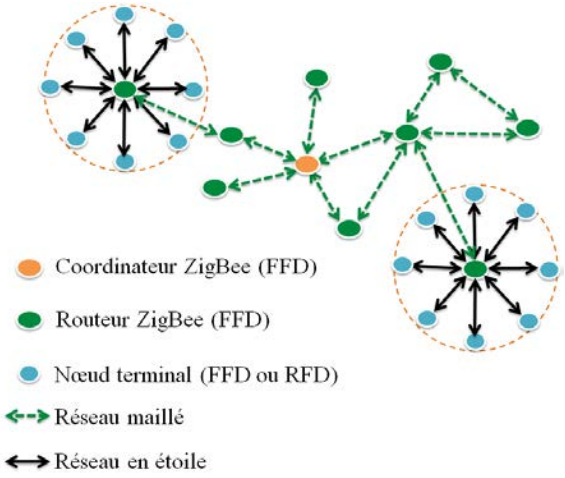


FIGURE 3.9 – Topologies LR-WPAN

L'UWB (Ultra Wide Band) [104] est une génération de technologie de communication sans fil de courte portée (< 30 m) qui consomme peu d'énergie et qui permet le transfert de données à haut débit. Sa particularité étant de transmettre des successions d'impulsions très courtes, entre 10 et 1000 ps.

La technologie Bluetooth est conçue comme un réseau sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network) avec une application qui est très répondue : la connexion des périphériques à un ordinateur [105]. Mais, cette technologie a déjà été utilisée comme moyen de communication pour applications de type réseau de capteurs sans fil [106].

Les réseaux basés sur la technologie Bluetooth, sont généralement organisés en "piconet" et "scetternet" avec un maître et jusqu'à sept nœuds esclaves actifs. Ainsi, le maître choisit la séquence de saut où les esclaves doivent le suivre. Un exemple de réseau de ce type constitué de trois "piconet" est présenté sur la FIGURE 3.10.

Cette technologie ne peut pas être utilisée pour les réseaux de capteurs sans fil car elle présente des inconvénients majeurs :

- Le nombre relativement limité d'esclaves actifs par "pico réseau". Ceci n'est pas compatible avec le cas des WSNs, où un grand nombre de nœuds serait nécessaire.
- Le besoin d'avoir constamment un nœud maître qui dépense beaucoup d'énergie sur les sondages de ses esclaves.
- Il est nécessaire que chaque nœud soit capable de prendre le rôle de maître ou d'esclave, ce qui rend le système complexe. Aussi, la fréquence rapide de saut entre les opérations nécessite une synchronisation étroite entre les nœuds d'un tel réseau.

La norme IEEE 802.11 a été conçue à la fois pour des infrastructures de réseau Ad'Hoc et, en général, est destinée à laisser un certain nombre d'utilisateurs à partager le canal de communication, fonctionnement qui ne correspond pas aux objectifs des réseaux de capteurs sans fil. Cette norme présente certaines fonctionnalités pour économiser de l'énergie[27]. Mais,

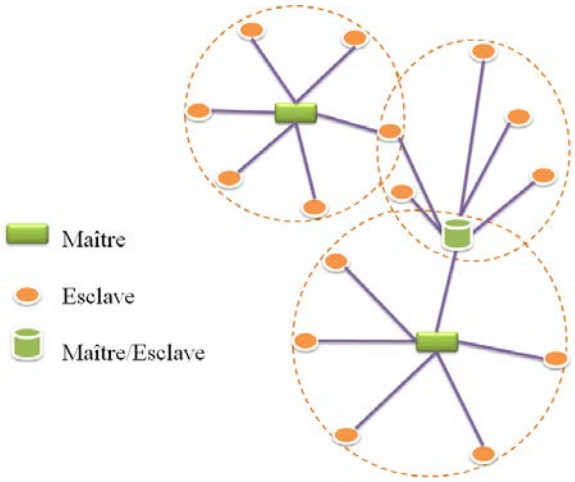


FIGURE 3.10 – Réseau scatternet Bluetooth

cette norme est caractérisée par des débits importants où les émetteurs-récepteurs requièrent beaucoup d'énergie.

Les technologies discutées ici présentent quelques avantages et des inconvénients. Le tableau 3.2 résume et compare les caractéristiques de ces technologies. L'IEEE 802.11 a une bande passante importante et offre un débit élevé, la technologie ZigBee est caractérisée par une longue portée et une faible consommation d'énergie qui est un atout non négligeable dans le cas de notre application.

3.3.2 La technologie IEEE 802.15.4/ZigBee

La norme IEEE 802.15.4 définit la couche MAC et la couche physique pour les réseaux personnels sans fil à bas débit (LR-WPAN). Cette norme convient très bien aux besoins des réseaux de capteurs sans fil bas débit, faible consommation d'énergie et bas coût des entités du réseau. Deux types d'entités réseau sont définit par ce standard : les FFD [4] et les RFD [5]. Un composant FFD peut fonctionner selon trois profils différents dans un réseau IEEE 802.15.4 : coordinateur du PAN, routeur ou nœud terminal. En revanche, une entité RFD, qui est un composant à fonctionnalités réduites, ne peut être qu'un nœud terminal et donc ne contient pas toutes les fonctionnalités prévues pour la couche MAC 802.15.4. Un coordinateur peut communiquer avec n'importe quelle autre entité du réseau alors qu'un RFD ne peut communiquer qu'avec un FFD. Les RFD sont prévus pour des rôles applicatifs simples comme un capteur infrarouge passif chargé de faire une détection de présence ou un interrupteur commandant une source lumineuse. Toutefois, un RFD ne peut être associé qu'à un seul FFD à un instant donné.

Le standard IEEE 802.15.4 supporte deux types de topologies : les topologies étoile et

4. Full Function Device
5. Reduced Function Device

Norme	Portée	Fréquence	Débit	Puissance (en activité)	Informations complémentaires
IEEE 802.11	500 m	2.4 - 5 GHz	54 Mb/s	350 mA	Norme bien maîtrisée, très répandue, avec des performances limitées
UWB	< 30 m	3.1 - 10.6 GHz	480 kbit/s (27 Mbps pour 802.15.4a)	30 mA	Basse consommation, complexité des récepteurs
ZigBee	1.5 km	2.4 GHz - 868 MHz	250 kbit/s	50 mA	Basse consommation, gestion sécurisée et fiable, 65000 nœuds
Bluetooth	100 m	2.4 GHz	1 kb/s	100 mA	Connexion immédiate, configuration simple et rapide

TABLE 3.2 – Tableau comparatif des technologies de communication sans fil

pair-à-pair présentées dans la topologie d'un réseau LR-WPAN (FIGURE 3.9). En topologie étoile, les stations communiquent uniquement avec un nœud central. Dans une topologie pair-à-pair les les stations du réseau communiquent les unes avec les autres quand elles sont à portée. Les stations, dans le cas d'une topologie pair-à-pair peuvent associer d'autres entités au réseau, cela permet la formation d'un réseau plus complexe et plus large comme les réseaux maillés.

En réutilisant les couches physique et MAC du standard IEEE 802.15.4, la norme ZigBee apporte une amélioration à ce standard en spécifiant les couches réseau et application et propose un service de sécurisation des données. La FIGURE 3.11 décrit d'une manière simplifiée la pile protocolaire ZigBee. Chaque couche dispose de deux interfaces pour communiquer avec la couche supérieure : une interface pour les échanges des primitives de données (Data Entity) et une interface pour les échanges des primitives de gestion (Management Entity).

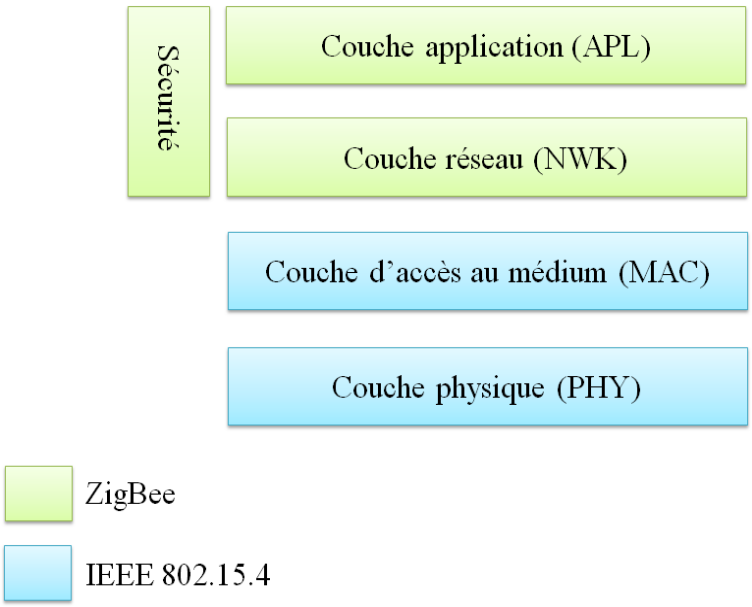


FIGURE 3.11 – La pile protocolaire ZigBee simplifiée

– **La couche PHY :** La couche physique IEEE 802.15.4 est généralement prise en charge par le module radio. Elle offre quatre débits différents. Le tableau 3.3 résume les débits proposés selon la fréquence et la modulation. Dans la bande de fréquences des 2.4 GHz, le débit est donc de 250 Kb/s, il lui est associé un seuil de réception qui va jusqu'à –92 dBm. Avec les trois plages de fréquences, la couche physique offre 27 canaux de transmission différents dont 16 sur la plage de fréquences de 2400/2483.5 MHz séparés de 5 MHz, 10 sur la plage de fréquences de 902/928 MHz séparés de 2 MHz et 1 canal sur la plage de fréquences de 868/868.6 MHz. L'usage de ces canaux dépend de la législation des pays dans lesquels des solutions conformes à ce standard sont utilisées.

Fréquence(MHz)	Modulation	Débit(Kb/s)
868/868.6	BPSK	20
868/868.6	ASK	250
868/868.6	O-QPSK	100
902/928	BPSK	40
902/928	ASK	250
902/928	O-QPSK	250
2400/2483.5	O-QPSK	250

TABLE 3.3 – Débit en fonction de la fréquence de la modulation

Parmi les fonctionnalités de contrôle de cette couche, nous pouvons disposer de celles qui permettent de :
– activer et désactiver le module radio ;
– remonter l'état d'un lien à la couche supérieure ;

- tester l'occupation du canal ;
- choisir le canal de transmission.

– **La couche MAC :** La couche MAC IEEE 802.15.4 supporte deux modes de fonctionnement selon les besoins applicatifs : le mode suivi de beacon et le mode non suivi de beacon. En mode suivi de beacon, le coordinateur envoie périodiquement un beacon pour synchroniser l'activité des entités qui lui sont attachées selon une structure de super-trame donnée sur la FIGURE 3.12.

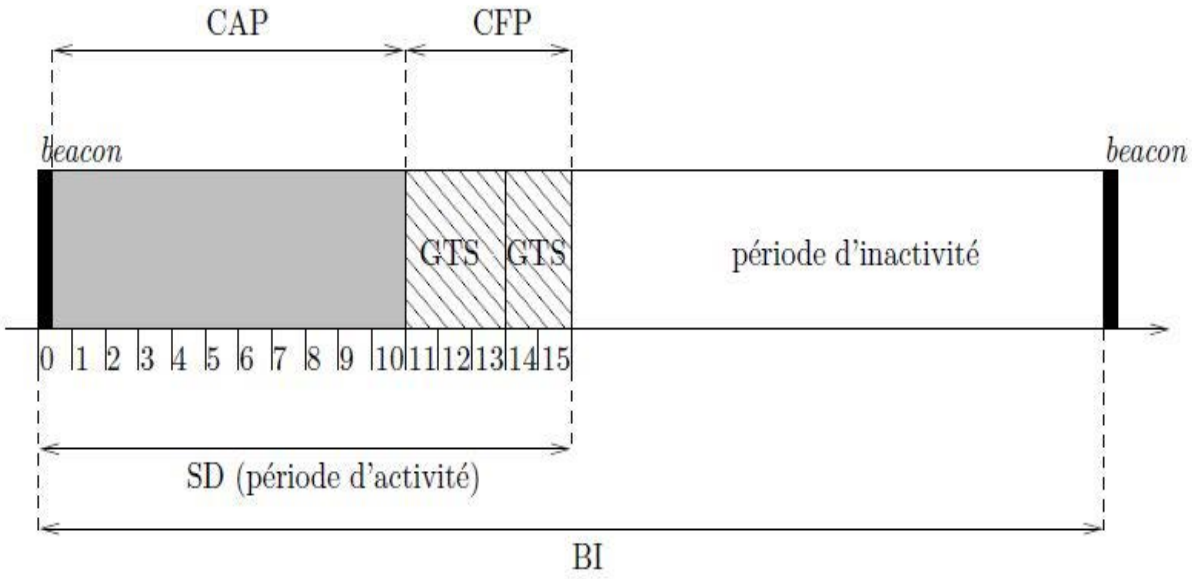


FIGURE 3.12 – Structure de la supertrame [1].

En mode non suivi de beacon, les beacons ne sont utilisés que pour la découverte du réseau.
Les fonctionnalités de gestion essentielles de la couche MAC IEEE 802.15.4 sont : l'accès au médium, les scans, la création du réseau et l'association, la synchronisation avec un coordinateur, les échanges de trames.

– **La couche NWK :** La couche réseau de la norme ZigBee est compatible avec la couche MAC IEEE 802.15.4 en assurant des fonctionnalités complémentaires et compatibles avec celles de la couche MAC. Il s'agit soit de fonctionnalités liées à la transmission de données, comme l'encapsulation des données applicatives et le choix du prochain saut du cheminement du paquet, soit de fonctionnalités liées à la gestion, comme la gestion des tables de routage, la configuration de la topologie et l'allocation des adresses logiques. Les fonctionnalités de gestion essentielles de la couche réseau de la pile IEEE 802.15.4/ZigBee sont :
  - création de la topologie
  - allocation des adresses
  - routage
– **La couche APL :** La couche application consiste en la sous-couche APS : Application

Sub-layer, ZDO : ZigBee Device Object et l'application définit par l'utilisateur. Les responsabilités de la sous-couche APS comprennent le maintien des tables de liaison, qui est la capacité de faire correspondre deux appareils ensemble sur la base de leurs services et de leurs besoins, et de transmettre des messages entre les appareils reliés. Les tâches de ZDO incluent la définition du rôle de l'entité au sein du réseau (par exemple, coordinateur ZigBee ou nœud terminal), des dispositifs découverts sur le réseau et déterminer quel type de services ils fournissent, l'initiation et / ou de répondre à des demandes de liaison et instituant une connexion sécurisée entre les périphériques du réseau.

Dans le cadre du développement de notre prototype-plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures, la transmission des données récoltées des capteurs vers la station de base sera basée sur la technologie IEEE 802.15.4/ZigBee. Cette norme convient très bien aux besoins de notre application en terme de débit, faible consommation énergétique, faible coût des entité du réseau, flexibilité de configuration et facilité de déploiement. En outre, une large gamme de modules radio-fréquence compatibles IEEE 802.15.4/ZigBee sont disponibles dans le marché.

Par la suite, nous nous proposons d'étudier le comportement de cette technologie dans plusieurs environnements, plus particulièrement, dans un environnement ferroviaire.

3.4 Caractérisation du canal de propagation et portée radio

Le déploiement des WSNs se fait dans des environnements multiples et différents selon l'application visée. Les communications radio sont directement influencées par les objets et obstacles présents dans cet environnement, ainsi que par l'architecture des lieux si l'on considère des applications dans les environnements indoor [6] (Bâtiments, bureaux, usines, trains,...). Pour déployer ce type d'application dans un environnement ferroviaire outdoor [7] (le long de la voie) ou indoor (à l'intérieur d'un train), la connaissance de la propagation du signal dans cet environnement est nécessaire pour la fiabilité et la sécurité de l'ensemble du système. Cela fait appel à deux domaines de recherche. En premier lieu, l'étude des caractéristiques de propagation est nécessaire afin de prédire les lois de propagation qui régissent l'atténuation du signal dans l'environnement ferroviaire ainsi que les trajets multiples. Deuxièmement, les effets de la perturbation externe et les interférences sur les signaux sans fil doivent également être étudiées.

6. environnement intérieur
7. environnement extérieur

3.4.1 Modèles de propagation radio-fréquence

Plusieurs modèles ont été proposés dans des environnements indoor et outdoor dans la littérature pour prédire l'influence de l'environnement sur le signal radio, et en particulier, l'estimation de la puissance reçue en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

a) Modèle espace libre (modèle de Friis) : Ce modèle considère les conditions de propagation comme étant idéales, et que le rayon de propagation radio comme un cercle, à l'intérieur duquel la réception du signal est parfaite, et qu'au-delà aucune communication n'est possible. Ce modèle prend en compte uniquement le chemin direct (visibilité direct) (LOS : Line-Of-Sight) entre l'émetteur et le récepteur. La puissance reçue (P_r) en fonction de la distance (d) est estimée par l'équation (3.1) [107] :

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \tag{3.1}$$

Où, P_t est la puissance de transmission, G_t et G_r sont les gains respectifs des antennes de l'émetteur et du récepteur, λ est la longueur d'onde. À 2.4 GHz, $\lambda = 12.5$ cm. L'expression de la puissance reçue en $[dBm]$ en espace libre est donnée par l'équation (3.2) :

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] + G_t + G_r - 40 - 20log(d) \tag{3.2}$$

À partir de l'équation (3.2), l'atténuation (Path Loss) est donnée par :

$$P_L[dB] = 40 + 20log(d) \tag{3.3}$$

b) Modèle à deux rayons (Two ray-ground) : Ce modèle considère le chemin direct (LOS) de la propagation et un chemin de propagation indirect (NLOS : Non Line Of Sight) issue de la réflexion provoquée par le sol. La puissance du signal reçu est exprimée par l'équation (3.4) :

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \tag{3.4}$$

La puissance du signal reçu ne dépend plus de la longueur d'onde λ (et donc de la fréquence), mais de la hauteur des antennes de l'émetteur et du récepteur (h_t et h_r). Le path loss à une distance d en $[dB]$ est donné par l'équation (3.5) :

$$P_L[dB] = 40log(d) - (G_t + G_r + 20log(h_t) + 20log(h_r)) \tag{3.5}$$

Dans ce modèle le rayon de communication est considéré comme un disque parfait, ce qui reste loin de la réalité.

c) Modèle log-normal shadowing : Dans ce modèle, plusieurs phénomènes de propagation tel que la réflexion, la diffusion et l'absorption, sont considérés. Log-normal shadowing [108] est un modèle générique et une extension au modèle de Friis. Il prédit la puissance moyenne du signal reçu en (dBm) suivant l'équation (3.6) :

$$\overline{P_r}[dBm] = P_t[dBm] - \overline{P_L}(d_0) - 10nlog\left(\frac{d}{d_0}\right) - X_\sigma \tag{3.6}$$

Où, $\overline{P_L}(d_0)$ est l'atténuation moyenne à une distance de référence d_0, n est l'exposant de l'atténuation, X est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type σ. σ est appelé déviation du shadowing, et est obtenu par mesure.

L'atténuation moyenne en [dB] est exprimée par l'équation (3.7) :

$$\overline{P_L}[dB] = \overline{P_L}(d_0) + 10nlog\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \tag{3.7}$$

Dans le tableau (Tab.3.4) sont données quelques valeurs de n selon l'environnement.

Environnement		n
Externe	Espace libre	2
Externe	Espace urbain	2.7-5
Interne	Visibilité directe	1.6-1.8
Interne	Visibilité obstruée	4-6

TABLE 3.4 – Valeurs typiques du paramètre n

Le tableau (Tab.3.5) présente quelques valeurs de σ_{dB} selon l'environnement.

Environnement	σ_{dB}
Externe	4-12
Bureau, séparation fixes	7
Bureau, séparations flexibles	9.6
Usine, visibilité directe	3-6
Usine, visibilité obstruée	6.8

TABLE 3.5 – Valeurs typiques du paramètre σ_{dB}

d) Modèle ITU-R (Recommandation P.1238-4) : Le modèle ITU-R [109] est un modèle de propagation radio qui permet de prédire les pertes de trajet entre un émetteur et un récepteur à l'intérieur d'une pièce ou une zone fermée à l'intérieur d'un bâtiment délimitée

par des parois de toute forme. Ce modèle est adapté pour des applications indoor. Il prend en compte l'effet des plafonds (dalles) des étages du bâtiment dans le calcul de l'atténuation du signal radio. Ce modèle est formellement exprimé par l'équation (3.8) :

$$P_L[dB] = 20log(f) + nlog(d) + L_f(k) - 28 \tag{3.8}$$

où f est la fréquence de transmission, n est le coefficient d'atténuation, k le nombre de plafonds (dalles) entre l'émetteur et le récepteur et $L_f(k)$ le facteur de pénétration des murs.

e) Modèle Moteley-Keenan : Le modèle Motley-Keenan [110] peut être appliqué pour des environnements de type bureau (dense). En plus de l'atténuation en espace libre, ce modèle prend en compte les pertes dues aux obstacles traversés. À 2.4 GHz l'atténuation total est donnée par l'équation (3.9) :

$$P_L[dB] = \quad 40 + 10nlog(d) + \Sigma_{m=1}^{M} P_m + \Sigma_{k=1}^{K} P_k \tag{3.9}$$

où P_m est la perte relative aux m murs traversés et P_k est la perte due aux k dalles traversées.

Après avoir rappelé les principaux modèles de propagation radio, connus par la communauté scientifiques du domaine, nous présentons par la suite, les premiers résultats d'une campagne de mesures de RSSI : Received Signal Strength Indication, c'est à dire la puissance du signal reçu en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Ces mesures ont été effectuées avec du matériel réel et dans différents environnements indoor et outdoor. Plusieurs scénarios de mesures ont été sélectionnés et les résultats expérimentaux sont comparées aux modèles théoriques présentés ci-dessus, afin d'étudier les caractéristiques du canal de propagation dans la fréquence de travail sélectionnée avec la norme de communication choisi.

3.4.2 Dispositif expérimental

a) Besoins matériel et logiciel

Les nœuds utilisés pour effectuer ces mesures sont constitués par des modules radio-fréquence de type XBee-Pro ZB (S2B) [111] pour la communication radio. Ces derniers fonctionnent à une fréquence de 2,4 GHz dans la bande ISM [8]. Les modules XBee-Pro S2B disposent d'une puissance rayonnée maximale de 18 [dBm] et leur sensibilité est de -102 [dBm].

Chaque nœud est basé sur une plateforme Arduino [112]. Cette plateforme dispose d'un processeur Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Pour connecter le module RF à la carte Arduino, une carte d'interface a été conçu. La FIGURE 3.13 illustre l'architecture matériel des nœuds utilisés pour ces mesures.

8. Industry Science and Medical

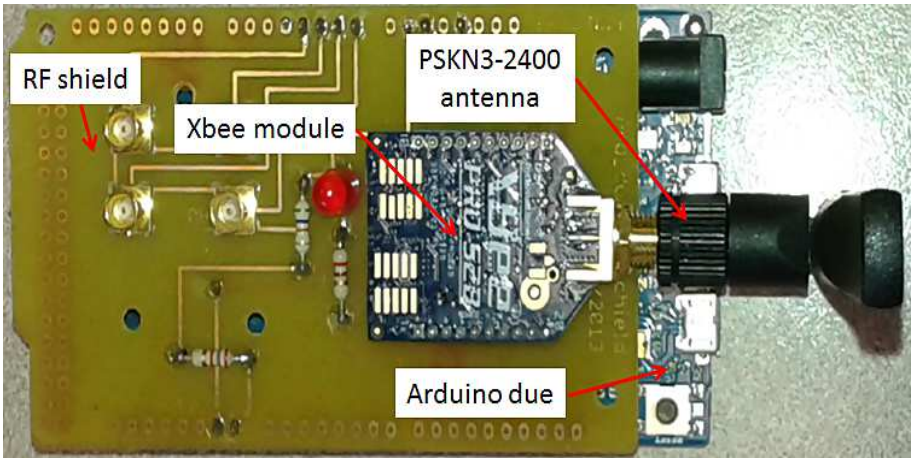


FIGURE 3.13 – Photo d'un nœud capteur utilisé dans cette étude.

Pour la configuration des modules de communication radio, le logiciel XCTU version : 6.1.0 Copyright Digi International 2013, qui est un logiciel de configuration et de test, est utilisé. Il permet aussi de tester le bon fonctionnement des modules radio. La phase de configuration permet de choisir le type de fonctionnement (nœud terminal, routeur ou coordinateur), d'écrire dans la mémoire du module des paramètres tels que le PAN ID : Identifiant du réseau PAN [9], le Baud rate qui désigne la vitesse de transfert des données en série, le niveau de puissance émise, etc. (FIGURE 3.14).

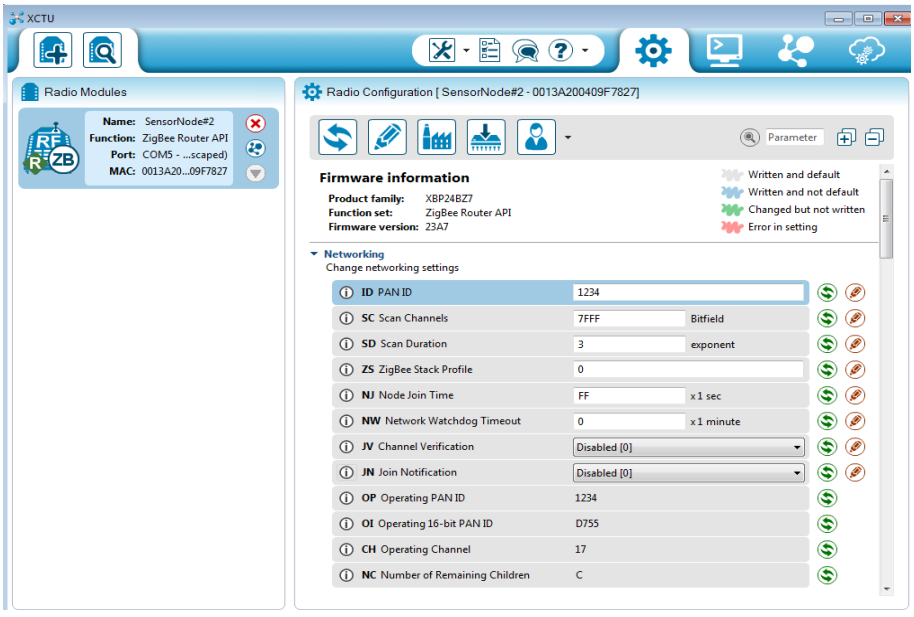


FIGURE 3.14 – Configuration du module radio avec le logiciel XCTU.

Pour cette étude sur le canal de propagation, deux nœuds ont été configurés : l'émetteur est configuré avec le firmware coordonnateur XBP24BZ7 en mode API [10], version du firmware

9. Personal Area Network
10. Application Programming Interface

est 21A7, Le récepteur est configuré avec firmware routeur XBP24BZ7 en mode API version du firmware 23A7.

b) Caractérisation des antennes et des modules XBee

Afin de bien préparer l'expérience de caractérisation du canal de propagation, nous avons déterminé les caractéristiques réelles des antennes et des modules XBee utilisés.

Dans un premier temps, nous avons commencé par déterminer le gain réel de l'antenne PSKN3-2400. La démarche suivie est la suivante : deux antennes de référence (antenne Horn, gain = 10 [dBi]) sont utilisées, l'une comme émetteur et l'autre comme récepteur. Ensuite, la puissance reçue à une distance fixe entre les deux est mesurée. La même démarche est suivie en utilisant une antenne de référence (Horn) comme émetteur et une antenne PSKN3-2400 (à caractériser) comme récepteur (voir FIGURE 3.15). Enfin, le gain réelle de l'antenne PSKN3-2400 est déterminé en utilisant l'équation (3.12). La valeur de ce gain est 2 [dBi].

$$P_{ref} = P_t + loss + G_{ref} \tag{3.10}$$

$$P_{ant} = P_t + loss + G_{ant} \tag{3.11}$$

$$(3.10) - (3.11) \Rightarrow P_{ref} - P_{ant} = G_{ref} - G_{ant}$$

$$G_{ant} = G_{ref} - P_{ref} + P_{ant} \tag{3.12}$$

où P_{ref} est la puissance reçue en utilisant deux antennes Horn, l'une comme émetteur et la deuxième comme récepteur. P_t représente la puissance transmise, G_{ref} est le gain de l'antenne Horn. *loss* représente la perte du signal par propagation de l'émetteur au récepteur. P_{ant} et G_{ant} sont la puissance reçue et le gain de l'antenne PSKN3-2400 respectivement.

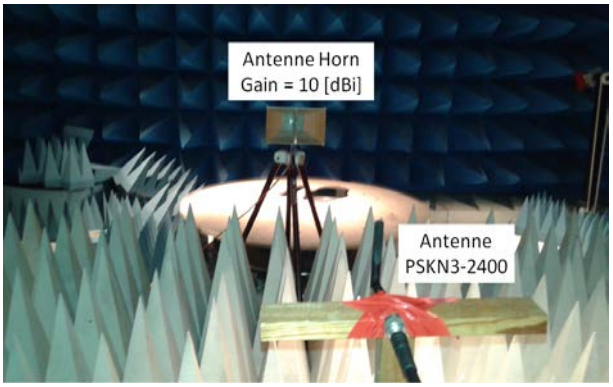


FIGURE 3.15 – Détermination du gain de l'antenne PSKN3-2400

Concernant les modules de communication radio, nous avons mesuré la puissance maximale transmise réelle d'un module Xbee en le reliant à un analyseur de réseau. Le mode

prédominant est repéré à une fréquence de 2.41579 GHz. La puissance maximale mesurée en sortie du module XBee est de 7.54 [dBm]. Une photo de cette mesure est montrée sur la FIGURE 3.16.

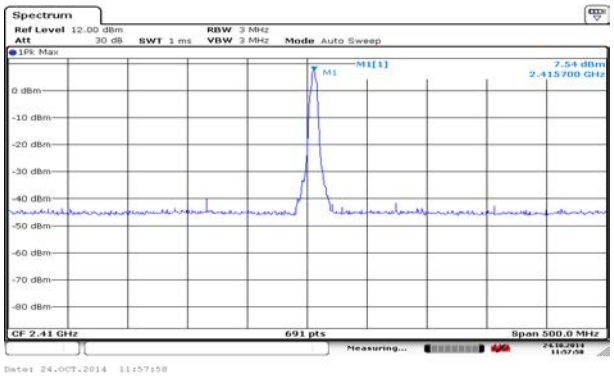


FIGURE 3.16 – Photo de la mesure du mode prédominant et de la valeur de la puissance maximale en sortie du module XBee par l'intermédiaire d'un analyseur de réseau.

Après la préparation du matériel et du logiciel, la caractérisation des antennes et modules de communication radio, le paragraphe suivant est dédié à la description de la méthodologie de mesure pour les différents scénarios sélectionnés.

3.4.3 Mesure de l'atténuation du canal

Plusieurs scénarios de mesure indoor/outdoor sont sélectionnés dans cette étude : chambre anéchoïque, hall de laboratoire, environnement de type couloir, inter-classes, inter-bureaux, environnement de type stade et voie ferroviaire. Cette étude suppose que les nœuds sont statiques et les variations du canal sont dues à l'environnement.

Pour tous les scénarios, la même procédure de mesure est appliquée : l'émetteur est placé dans une position fixe, le récepteur est déplacé par pas. L'émetteur est connecté et alimenté par un câble USB vers une station de base locale. La station de base est un ordinateur contenant une application Matlab®. Cette application initie l'acquisition et l'enregistrement des données. Dans un premier temps, une commande est éditée et envoyée vers l'émetteur. Ce dernier transmet un octet de données au nœud récepteur. Ensuite l'émetteur interroge le récepteur par une commande AT pour récupérer la valeur du RSSI du dernier paquet qu'il a reçu. La couche physique des modules XBee utilisés fournit un entier sur 8 bits qui représente une estimation du signal reçu. Cette valeur est connu sous le nom RSSI dans la communauté scientifique. Cette action est répétée 50 fois pour chaque position du récepteur pour améliorer la précision des mesures. Les données récoltées sont enregistrées dans la station de base pour le traitement et l'analyse.

a) Chambre anéchoïque

Une chambre anéchoïque (an-echoic, non-reflective, non-echoing ou echo-free)est une chambre conçue pour absorber complètement les réflexions des ondes sonores ou électromagnétiques.

Elle est également isolé par rapport aux sources de bruit extérieures. La combinaison des deux aspects permet de simuler un espace ouvert, isolé des ondes sonores, de dimension infinie. Ceci est utile, étant donné que les influences extérieures perturbent les résultats.

Nous avons effectués des mesures du RSSI en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur dans une chambre anéchoïque. Des distance de 0,9 à 6,10 mètres entre l'émetteur et le récepteur sont considérées. Le scénario de mesure est présenté sur la FIGURE 3.17.

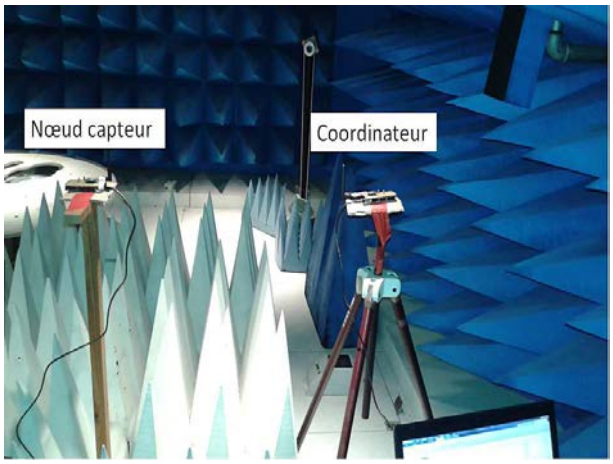


FIGURE 3.17 – Scénario de mesure du paramètre RSSI en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur dans une chambre anéchoïque.

b) Hall de laboratoire

Afin de tester l'influence d'un environnement indoor de type hall sur notre plateforme de communication, nous avons effectué une campagne de mesure dans le hall du laboratoire. Nous avons considéré un pas de déplacement du récepteur de 1 m. La distance maximale considérée entre l'émetteur et le récepteur est de 20 m. Ce scénario est illustré sur la FIGURE 3.18.a.

c) Environnement de type couloir

Nous avons également effectué des mesures dans un environnement de type couloir. Les mesures ont été prises avec un pas de déplacement du récepteur de 1 m jusqu'à une distance de 20 m entre l'émetteur et le récepteur. Ensuite un pas de 10 m est considéré jusqu'à une distance entre l'émetteur et le récepteur de 80 m. Ce scénario de mesure est illustré sur la FIGURE 3.18.b.

d) Scénario inter-classes

Afin d'analyser l'effet des murs, des dalles et différents type de matériels qui peuvent se retrouver dans un bâtiment de type bureaux ou classes, nous avons fait des campagnes de mesures dans ces environnements.

Dans l'environnement classes, nous avons effectué des mesures en fixant l'émetteur dans une salle de classe et nous avons déplacé le récepteur de sa position initiale salle de classe voisine jusqu'à 7 classes plus loin.

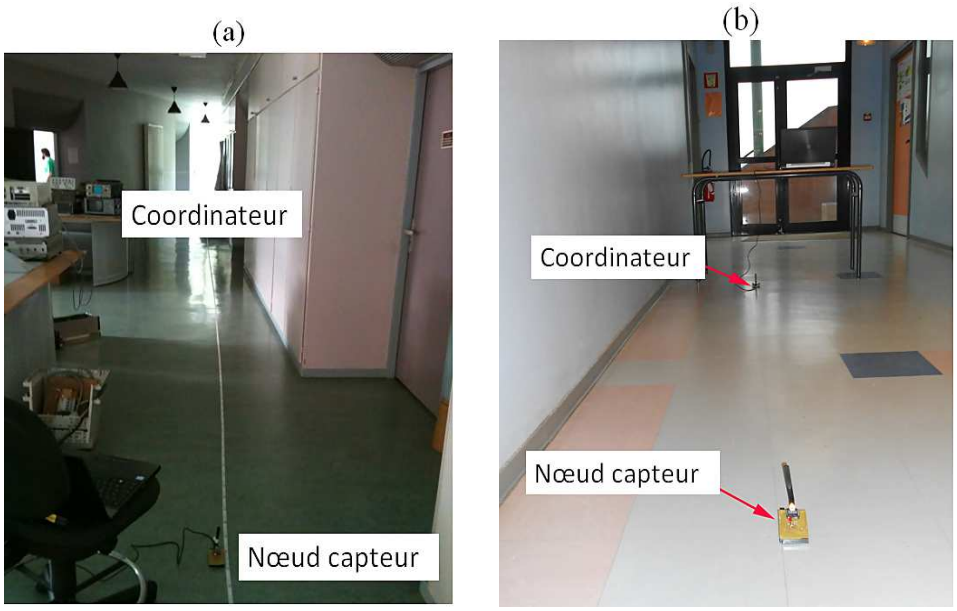


FIGURE 3.18 – Scénarios de mesure : (a) Hall de laboratoire et (b) Environnement de type couloir.

e) Scénario inter-bureaux

Pour le scénario inter-bureaux, nous avons pris les mesures en fixant l'émetteur dans le bureau 101. Le récepteur est déplacé de sa position initiale au bureau 102 jusqu'au bureau 107. Le plan des bureaux considérés dans cette campagne de mesure est présenté sur la FIGURE 3.19.

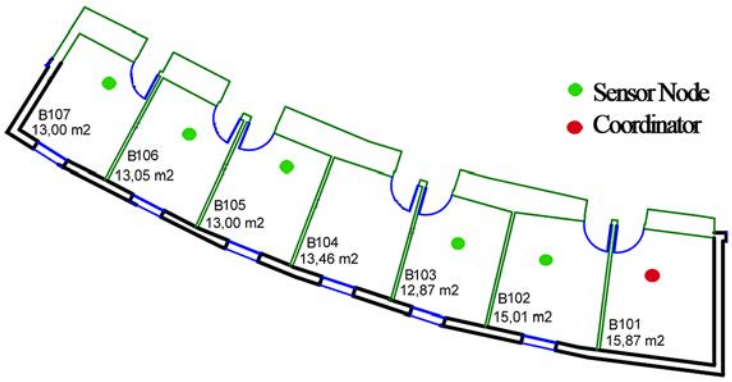


FIGURE 3.19 – Plan des bureaux considérés dans cette étude.

f) Environnement de type stade

Dans ce scénario, le récepteur est déplacé par pas de 1 m entre l'émetteur et le récepteur jusqu'à une distance de 30 m. Ensuite par pas de 5 m jusqu'à 40 m. Enfin 10 m jusqu'à une distance de 120 m entre l'émetteur et le récepteur. Les deux nœuds sont placés par terre. La FIGURE 3.20 illustre ce scénario.

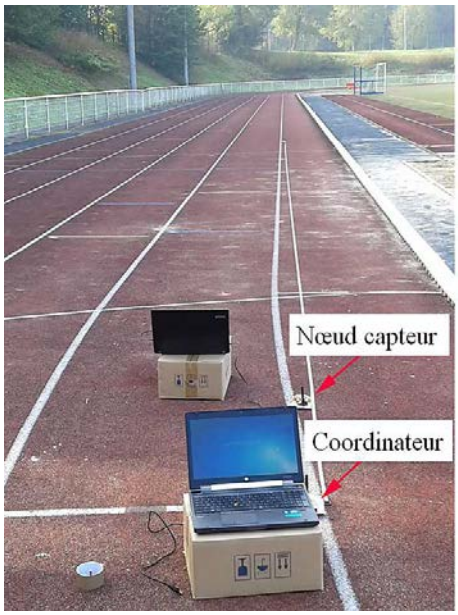


FIGURE 3.20 – Scénario de mesure dans un environnement dégagé : stade

g) Environnement ferroviaire

Étant donné le domaine d'application visé, qui est la surveillance des structures et infrastructures ferroviaires et pour se rapprocher d'une situation réelle, nous avons effectué des mesures de puissance reçue en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur dans un environnement de type voie ferroviaire.

Le long de la voie ferroviaire l'émetteur est fixe et le récepteur (nœud capteur) a été déplacé de sa position initiale, qui est de 1 m de l'émetteur, par pas de 1 m jusqu'à 30 m de l'émetteur. Ensuite par pas de 5 m jusqu'à une distance de 40 m de l'émetteur. Enfin, par pas de 10 m jusqu'à 76 m entre l'émetteur et le récepteur. Ce scénario est représenté sur la FIGURE 3.21.

3.5 Résultats de mesures, discussion et comparaison aux modèles théoriques

Après l'acquisition des valeurs du RSSI comme décrit précédemment (section 3.4.3) pour les différents scénarios étudiés, l'atténuation (path loss) est calculée pour chaque scénario suivant l'équation (3.13),

$$P_L[dB] = P_t[dBm] - G_t - G_r - RSSI[dBm] \tag{3.13}$$

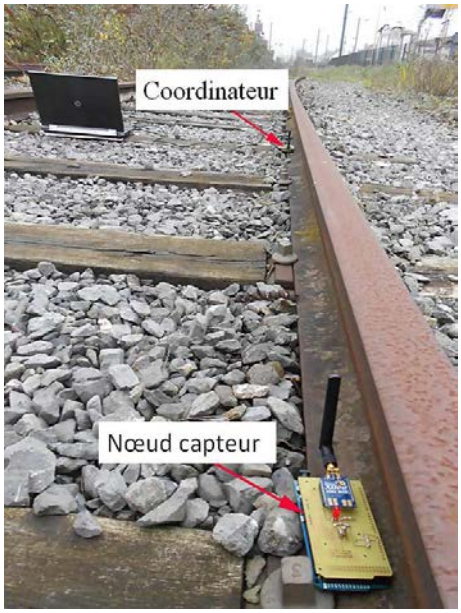


FIGURE 3.21 – Scénario de mesure dans un environnement de type voie ferroviaire.

50 mesures du RSSI sont réalisées pour chaque position du récepteur. L'atténuation moyenne pour chaque distance entre l'émetteur et le récepteur est calculée selon l'équation (3.14),

$$P_{Lmoy}(d)[dB] = \frac{1}{50}\Sigma_{i=1}^{50} P_L(d) \tag{3.14}$$

les résultats expérimentaux sont ensuite comparés aux modèles théoriques simulés dans Matlab®.

3.5.1 Résultats des scénarios indoor

a) Chambre anéchoïque

Les résultats de mesures dans la chambre anéchoïque sont comparés au modèle théorique de propagation considérant des conditions idéales (modèle de Friis). Les résultats sont présentés sur la FIGURE 3.22.

La FIGURE 3.22 représente les résultats obtenus dans le scénario de la chambre anéchoïque. La courbe représentée par des étoiles en bleu notée " valeurs mesurées " désigne les 50 valeurs de l'atténuation mesurées pour chaque position du récepteur. La courbe notée " courbe moyenne " est obtenue par la moyenne des 50 valeurs mesurées en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. La courbe en tirets bleu " Friis " représente l'atténuation relative au modèle de Friis simulé.

Dans ce graphique, on peut constater que les 50 mesures pour chaque distance fixe sont constantes. Ce résultat nous confirme les caractéristiques d'une chambre anéchoïque. Il est clair que l'atténuation mesurée en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur

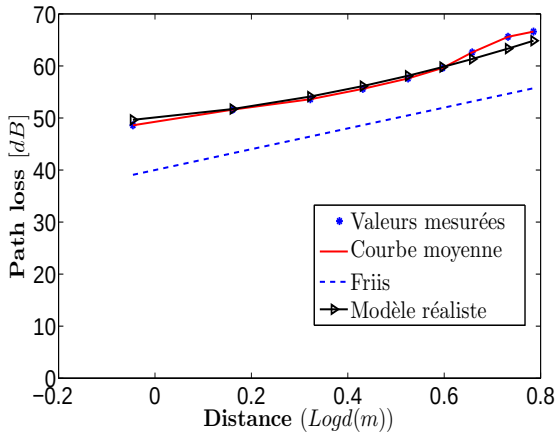


FIGURE 3.22 – Résultats obtenus de la campagne de mesures dans la chambre anéchoïque comparés au modèle de Friis.

n'est pas linéaire comme celle observée dans le modèle de Friis. Ceci peut être justifié par le fait que la chambre anéchoïque n'est pas un espace libre parfait. Toutefois, ces mesures nous ont permis de mesurer l'atténuation à $d_0 = 1\ m$, qui est de 49.26 dB.

Après plusieurs simulations et ajustement des paramètres sur Matlab®, on a obtenu une courbe plus réaliste qui caractérise l'environnement de mesure (chambre anéchoïque). Ce modèle est décrit par l'équation 3.15 et représenté par la courbe notée " modèle réaliste " dans la FIGURE 3.22.

$$P_L[dB] = 40 + 20log(d) + \alpha \tag{3.15}$$

Où α représente les pertes relatives aux imperfections de la chambre anéchoïque et aux conditions réelles de l'expérience. α est donné par l'équation 3.16,

$$\alpha = Ad^2 + Bd + C \tag{3.16}$$

et $A = 2.5$, $B = -5$, $C = 10$, d est la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Finalement, nous pouvons noter ici que les paramètres du modèle simulé ont une forte influence sur les résultats obtenus. Il est à noter que l'atténuation dans cet environnement est représentée par celle observée dans le modèle de Friis plus un coefficient relatif aux imperfections de la chambre anéchoïque et aux conditions de l'expérience.

b) Résultats obtenus des scénarios hall de laboratoire et couloir

Après le traitement et analyse des données récoltées, les valeurs de l'atténuation obtenues par les mesures pour les scénarios : hall de laboratoire (FIGURE 3.23.a) et environnement de type couloir (FIGURE 3.23.b) sont comparées aux modèles théoriques Friis et log-normal shadowing simulés avec les paramètres correspondant aux scénarios étudiés.

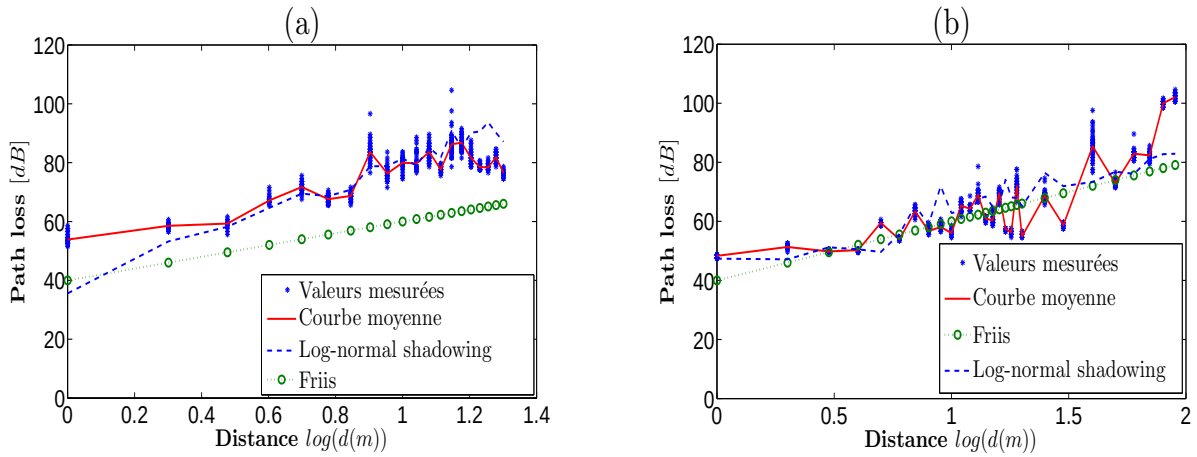


FIGURE 3.23 – L'atténuation mesurée comparée aux modèles théoriques Friis et log-normal : (a) scénario hall de laboratoire et (b) scénario couloir.

La FIGURE 3.23.a correspond aux résultats obtenus pour le scénario hall de laboratoire. Les valeurs de l'atténuation obtenues avec les mesures sont clairement supérieures à l'atténuation obtenue avec le modèle de Friis. Ce résultat confirme que nous ne sommes pas dans un environnement de type espace libre. Cependant le hall du laboratoire contient des objets (tables, chaises, armoires métalliques, etc.) qui génèrent des réflexions destructives et des multi-trajets. En effet, ceci perturbe et atténue la puissance du signal transmis. Des fluctuations sont apparentes dans les valeurs mesurées. La variation maximale de 26 $[dB]$ et minimale de 3 $[dB]$ sont notées dans ce scénario. On peut constater que le modèle log-normal shadowing avec les paramètres ($n = 4.2$, $\sigma = 30$ $[dB]$) caractérise mieux le canal dans cet environnement en prenant en compte les fluctuations dues aux trajets multiples.

Dans la FIGURE (3.23.b) correspondant aux résultats du scénario couloir, l'atténuation est proche de la courbe prédite avec le modèle de Friis comparées aux mesures obtenues dans le scénario hall du laboratoire. On peut noter des fluctuations dans les valeurs mesurées pour une distance donnée. La variation maximale est de 21 $[dB]$ et la minimale est de 0.68 $[dB]$. Ici encore, le modèle log-normal shadowing avec les paramètres ($n = 2.2$ and $\sigma = 32$ $[dB]$) caractérise le canal en prenant en compte les fluctuations.

Dans ces figures (FIGURE 3.23.a et FIGURE 3.23.b), on peut noter que pour les longues distances, le modèle log-normal montre des différences larges par rapport à l'atténuation moyenne mesurée. Ces différences peuvent être justifiées par le fait que lorsque la distance émetteur-récepteur augmente, la puissance du signal reçue mesurée (RSSI) diminue. Pour de plus longues distances les puissances mesurées sont proches des puissances minimales que les modules utilisés peuvent détecter (sensibilité des modules RF fournies par le fabricant est : -102 [dBm]). De plus, l'architecture des bâtiments où les mesures sont effectuées influence les mesures. En effet, pour de longues distances les mesures sont moins précises que celles obtenues avec de courtes distances. Ces imperfections ne sont pas prises en compte par le modèle log-normal.

c) Résultats obtenus des scénarios inter-classes et inter-bureaux

Après plusieurs simulations avec le modèle Motley-Keenan pour différentes valeurs du paramètre n, une valeur de n=3.2 est retenue. Les FIGURES 3.24.a et 3.24.b) représentent les résultats obtenus des scénarios inter-classes et inter-bureaux respectivement. Ces résultats sont comparés au modèle Motley-Keenan simulé avec n = 3.2 et plusieurs valeurs du paramètre P_m qui correspond aux pertes relatives aux murs (séparation) traversés.

On peut noter des fluctuations dans les résultats de mesures. La variation maximale est de 7 $[dB]$ pour le scénario inter-classes et 23 $[dB]$ pour le scénario inter-bureaux. La variation minimale est de 2 $[dB]$ pour les deux scénarios. Ces résultats nous permettent de confirmer la valeur du coefficient de perte d'un mur en placo-platre qui est $P_m = 2.5$ $[dB]$. Le tableau. 3.6 montre les valeurs du coefficient de perte en fonction du type de matériau utilisé dans les séparations murales.

Test	Type de eparation	Coefficient de perte $[dB]$
Test 1	Placo-platre	2.5
Test 2	Verre	1.4
Test 3	Bois	1.5
Test 4	Béton	6

TABLE 3.6 – Les valeurs du coefficient de perte [3] utilisées pour les différents tests présentés sur les FIGURES 3.24.a et 3.24.b.

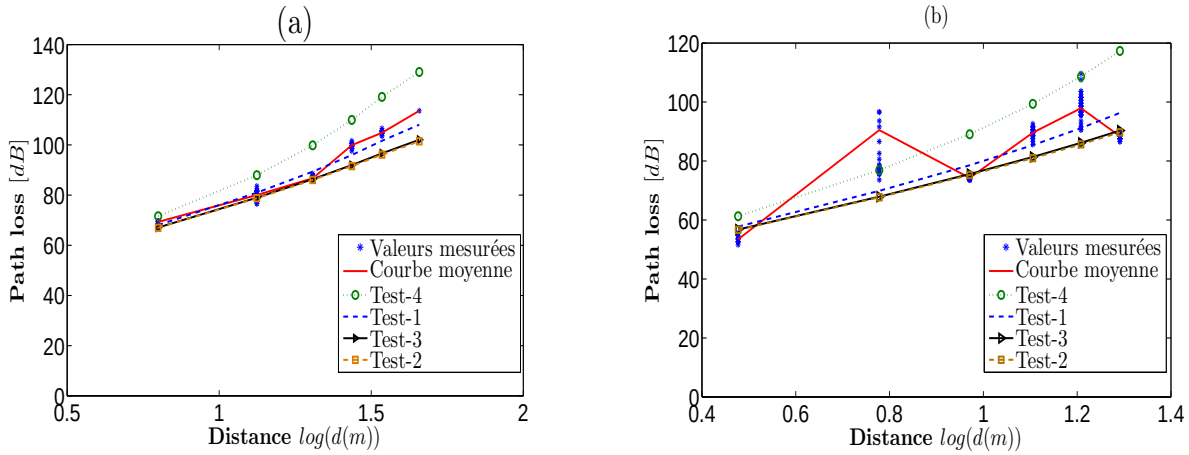


FIGURE 3.24 – Comparaison entre l'atténuation moyenne obtenue par les mesures et l'atténuation prédite par les modèles Motley-Keenan pour (n = 3.2, $P_k = 1$ et $P_m = 2.5$, 1.4, 1.5 et 6 $[dB]$) pour les scénarios : (a) inter-classes et (b) inter-bureaux.

La FIGURE 3.25.a et la FIGURE 3.25.b représentent la comparaison entre les résultats expérimentaux, le modèle théorique Motley-Keenan avec les paramètres : $n = 3.2$, $Pm = 2.5$ $[dB]$ et le modèle théorique ITU-R pour les scénarios inter-classes et inter-bureaux respectivement.

Nous constatons que le modèle théorique Motley-Keenan avec les paramètres $n = 3.2$ et $Pm = 2.5$ $[dB]$ est plus proche des caractéristiques de propagation pour le canal IEEE 802.15.4 dans ces deux environnements. Ceci peut être justifié par le fait que le modèle

Motley-Keenan prend en compte les pertes relatives aux murs de séparation entre l'émetteur et le récepteur. Le modèle ITU-R peut être utilisé quand plusieurs plafonds (dalles) séparent l'émetteur du récepteur.

Une large fluctuation est exprimée dans les FIGURES 3.24.b et 3.25.b correspondant aux résultats obtenus dans le cas du scénario inter-bureaux, notamment pour de longues distances. Quand la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, en allant du deuxième bureau au k^ième, le nombre de mur séparant l'émetteur du récepteur augmente. En effet, la puissance du signal reçu (RSSI) diminue. Pour les longues distances avec plusieurs murs entre l'émetteur et récepteur, les puissances mesurées sont proches des puissances minimales que les modules utilisés peuvent détecter. De plus, l'architecture du bâtiment (le plan des bureaux pris en compte dans le scénario inter-bureaux est donné sur la FIGURE 3.19) présente une inclinaison. Le type et les quantités des matériaux utilisés dans les murs de séparation ne sont pas exactement identiques d'un mur à l'autre. En outre, chaque bureau contient des armoires métalliques, chaises, matériel informatique, etc., ce qui perturbe les mesures. Enfin, les surfaces des bureaux et l'épaisseur des murs de séparation ne sont pas exactement identiques pour tous les bureaux. Ces imperfections ne sont pas prises en compte dans le modèle Motley-Keenan model ni dans le modèle ITU-R.

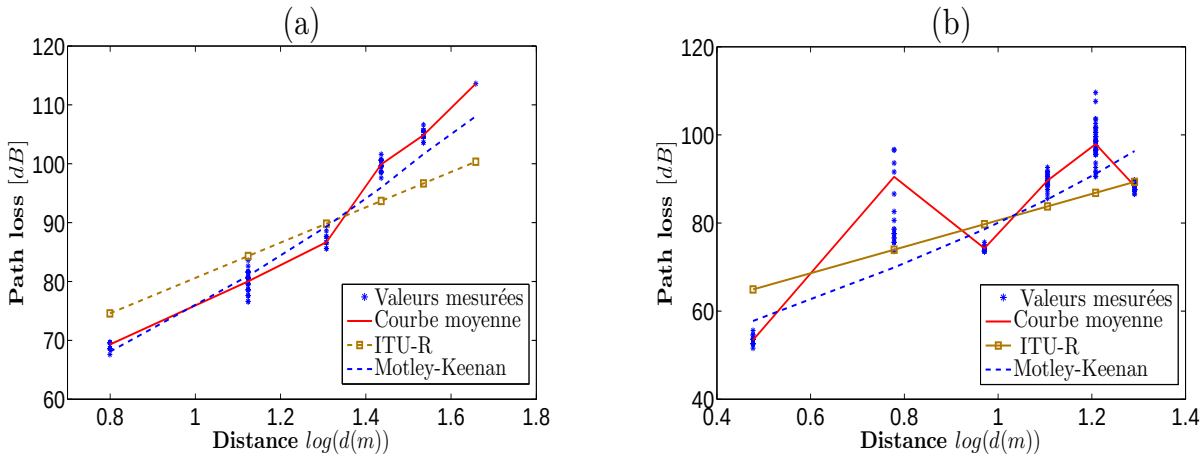


FIGURE 3.25 – Comparaison entre l'atténuation moyenne obtenue par mesure, l'atténuation prédite avec le modèle Motley-Keenan (n = 2 and $Pm = 2.5$ $[dB]$) et l'atténuation prédite avec le modèle ITU-R pour les scénarios : (a) inter-classes et (b) inter-bureaux.

3.5.2 Résultats obtenus pour les scénarios outdoor, stade et voie ferroviaire :

Notre dernière étape de cette étude sur le canal a été de déterminer un modèle précis qui permet de prédire les caractéristiques de propagation des modules utilisés pour notre application (plateforme de communication pour les capteurs sans fil basée sur le standard IEEE 802.15.4/ZigBee) dans un environnement outdoor. Étant donné le domaine d'application visé, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques de propagation dans un tel canal. Ici, nous comparons les résultats de mesure aux modèles théoriques dans deux environnements

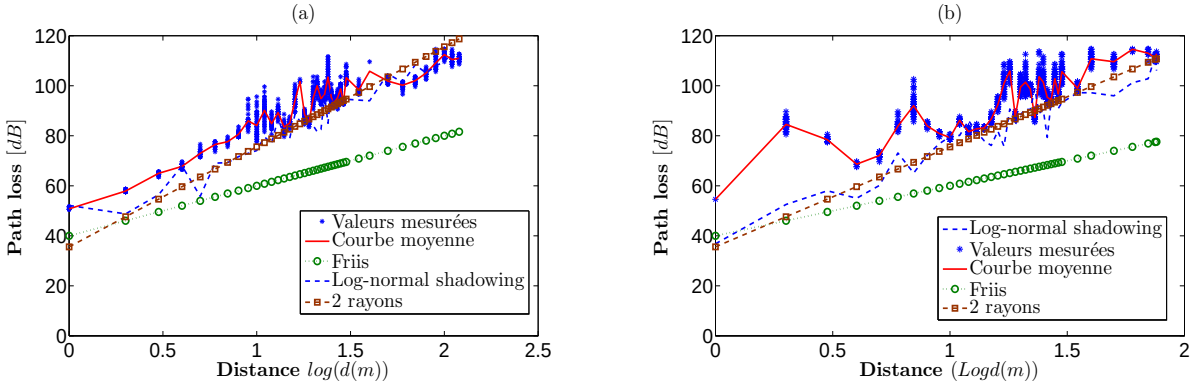


FIGURE 3.26 – Comparaison de l'atténuation moyenne obtenue par mesure et l'atténuation prédite par les modèles Friis, 2 rayons et Log-normal shadowing pour les scénarios (a) stade et (b) voie ferroviaire.

outdoor différents : stade et voie ferroviaire.

Les résultats obtenus des deux scénarios sont comparés aux modèles : Friis, 2 rayons et log-normal shadowing. Ces résultats sont présentés dans les FIGURES 3.26.a et 3.26.b.

Dans les deux figures, les valeurs mesurées de l'atténuation sont supérieures à celles prédites par le modèle de Friis. Ceci est justifié par le fait que les deux environnements considérés ne sont pas des espaces libres et contiennent des objets qui contribuent aux pertes du signal. On peut noter que le modèle à deux rayons est proche des valeurs mesurées. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le modèle 2 rayons prend en compte l'atténuation reliée au trajet réfléchi par la terre. Toutefois, ce modèle n'inclut pas les fluctuations liées aux pertes par multi-trajets. Pour les deux environnements, le modèle log-normal shadowing présente une courbe d'atténuation plus proche aux valeurs mesurées. En comparant les résultats obtenus dans le cas du stade à ceux de la voie ferroviaire, on peut noter des fluctuations plus élevées dans le scénario de la voie ferroviaire. Ceci est justifié par le fait que le stade est plus proche d'un espace libre qu'un chemin de fer. De plus, le chemin de fer contient des éléments de la voie en métal qui induisent des réflexions et des multi-trajets.

3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes effectuées pour modéliser notre plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures. Nous avons proposé une description de l'application du point de vue des besoins, des contraintes et des propositions, en tenant compte du cahier des charges. Plus exactement, nous avons abordé la première phase dans la réalisation de notre application, à savoir :

La phase d'analyse : qui consiste à étudier le système, à identifier les acteurs intervenants dans notre topologie, à décrire les cas d'utilisation, à travers l'étude des besoins et des contraintes fonctionnelles. Cette étape a permis de mieux saisir le fonctionnement global du

réseau afin de faciliter la concrétisation de l'étape suivante.

Ensuite, nous nous sommes intéressés aux technologies existantes et potentiellement intéressantes pour notre application. Nous avons comparés ces technologies en décrivant leurs avantages et inconvénients. La technologie ZigBee/IEEE 802.15.4 dans la bande de fréquence ISM est identifiée comme un bon candidat pour assurer les transmissions des données/commandes entre les capteurs et la station de base.

La phase de déploiement d'applications de WSN exige une connaissance précise de la propagation du signal dans le scénario ciblée. Plusieurs travaux de recherche dans le domaine ont présenté des résultats de simulation de WSN. La plupart de ces travaux sont basés sur des hypothèses simplistes de la couche physique et des modèles de canaux et il n'y a pas d'études expérimentales sur des modules réels et proche du sol et encore moins dans un environnement de chemin de fer concernant les réseaux de capteurs sans fil. Raison pour laquelle, nous avons réalisé une étude expérimentale comparative sur la caractérisation d'une transmission ZigBee/IEEE 802.15.4 en terme d'atténuation et de portée dans plusieurs environnements.

Après l'étape d'analyse du système et de ses différents acteurs, le choix de la technologie de communication sans fil et la caractérisation du canal de propagation, dans le chapitre quatre, nous allons nous intéresser à la dernière étape qui est la conception et le déploiement de notre prototype-plateforme de communication pour le CSI des structures.

CHAPITRE 4

Démonstrateur de CSI sans fil à détection passive : Application au contrôle-santé des rails

Sommaire

4.1 Introduction 88
4.2 Problématique de la synchronisation temporelle 90
4.2.1 Description du problème 90
4.2.2 État de l'art des techniques de synchronisation dans les WSNs . . 90
4.2.3 Mesure du décalage entre deux nœuds capteurs ZigBee au laboratoire 93
4.3 Proposition d'une solution de synchronisation précise, économique et flexible 96
4.3.1 Description de la solution proposée 97
4.3.2 Évaluation de la solution proposée 97
4.4 Description du prototype plateforme de WSN développé 99
4.5 Validation du prototype développé : Démonstrateur CSI-ZigBee à détection passive 104
4.5.1 Comparaison entre une transmission filaire et une transmission sans fil réalisée avec la plateforme prototype développée 105
4.5.2 Algorithmes et trames échangées dans la plateforme de communication sans fil 107
4.5.3 Application à la détection passive de défaut 110
4.6 Les limites du système développé et perspectives d'évolution du prototype 115
4.7 Conclusion 116

4.1 Introduction

Un des objectifs principaux de ce travail de thèse était d'étudier les récents progrès des technologies sans fil pour les WSNs afin d'explorer la possibilité de les intégrer dans les

systèmes de contrôle-santé des structures et infrastructures ferroviaires.

Conformément aux expériences et tests de détection de défaut par corrélation de champs de bruit présentés dans le chapitre deux, il faut utiliser des signaux longs (environ 100 ms dans les conditions d'expériences présentées au chapitre deux). Les caractéristiques des nœuds capteurs (unité d'acquisition) doivent être choisies avec soin. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la technique de corrélation de champs de bruit acoustique et son application à la détection de défaut. Ainsi, nous avons présenté une étude expérimentale préliminaire sur la reconstruction de la réponse active par corrélation de champs de bruit acoustique dans un contexte ferroviaire. Par ailleurs, nous avons fait une comparaison entre une expérience d'émission-réception active et une expérience avec corrélation de bruit et ainsi validé le principe de détection passive de défaut sur un échantillon de rail ferroviaire.

Dans le chapitre trois, nous avons fait une description de notre application d'un point de vue des besoins, des contraintes et des propositions, en tenant compte du cahier des charges. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la topologie du système, les technologies sans fil potentiellement intéressantes pour notre système. Nous avons comparé et évalué les performances de notre système de communication dans plusieurs environnements pour déterminer l'influence du canal de propagation sur celui-ci. Nous avons ainsi évalué les éléments suivants :

- impact sur la communication ;
- baisse de la portée ;
- perte du signal.

Dans la continuité des chapitres précédents, afin de valider les travaux présentés et de démontrer la faisabilité et le potentiel du système de CSI passif avec une capacité de communication sans fil, dans ce chapitre quatre, on propose de déployer un réseaux de capteurs sans fil ZigBee sur un échantillon de rail ferroviaire. Le système proposé dans ce travail est le produit d'une combinaison des dernières techniques de CSI et des technologies de communication basse consommation qui sont nécessaires pour répondre aux exigences élevées de l'application de détection précoce d'anomalies pour le contrôle et le suivi des structures et infrastructures ferroviaires critiques.

Nous avons constaté que le domaine des WSNs suscite un engouement considérable et il est aujourd'hui intensivement analysé et étudié. L'une des problématiques les plus importantes est liée à la consommation d'énergie, car cela a un impact majeur sur la durée de vie du réseau. Une autre contrainte qui surgit dans le cas de certaines applications, telles que le CSI des structures, est que les données prélevées par les capteurs doivent être datées avec précision. Par la suite, nous nous concentrons sur la problématique de synchronisation et nous proposons une solution qui répondra aux besoins de notre application.

4.2 Problématique de la synchronisation temporelle

4.2.1 Description du problème

La synchronisation peut être simplement souhaitable ou un besoin crucial. Dans certaines applications, l'envoi occasionnel d'un paquet de données peut être plus que suffisant, dans d'autres, il y a des besoins de fiabilité plus élevés et dans d'autres encore, la prise en compte du retard est très importante lorsque des capteurs/actionneurs doivent être contrôlés en temps réel par le réseau. Par conséquent, le taux de livraison de paquets est une métrique insuffisante. Il existe donc aussi un besoin de synchronisation dans la transmission des données pour les WSNs.

Par exemple, pour mesurer une température qui est une grandeur physique qui évolue lentement en fonction du temps, un écart de datation de l'ordre de la seconde entre deux mesures distinctes n'influence généralement pas les algorithmes de thermo-contrôle ; en revanche, dans le domaine de la propagation des ondes dont la dynamique est élevée (de l'ordre de 5000 $m.s^{-1}$ dans l'acier ou le béton), les données résultantes de l'échantillonnage de ces ondes doivent souvent être corrélées avec une précision de l'ordre de la microseconde.

Comme tout système électronique (ordinateur, smartphone, etc.), le capteur intelligent intègre nativement un quartz, c'est-à-dire un composant électronique qui lui permet de compter le temps. Comme chaque quartz possède sa propre incertitude et que les capteurs ne démarrent pas en même temps, les bases de temps des capteurs ne peuvent être parfaitement en phase sans un mécanisme de synchronisation.

Dans les réseaux filaires, il est simple de mettre en œuvre un mécanisme de synchronisation. Dans ce cas, on peut employer un des fils pour véhiculer un bit de synchronisation pour les capteurs. Cependant, dans le cas des liaisons sans-fil, ce top de synchronisation est envoyé par ondes radio aux capteurs depuis le nœud superviseur, il se propage à travers le réseau, marqué par sa topologie, il est capté par le module radio du capteur, décodé et interprété comme une interruption de synchronisation. À ce délai, il faut ajouter ceux, non déterministes, dus au transit des données, aux échecs (mécanisme d'échec/ré-émission des trames, transparent pour l'utilisateur), à l'exécution des protocoles au niveau de chaque capteur, à la topologie et à la mise en œuvre physique du protocole sans-fil (Ad'Hoc, broadcast ou diffusé, etc.). Ces délais additionnés constituent la latence d'un réseau. Du fait de cette latence et des topologies des réseaux, la simple distribution d'un signal de synchronisation ne permet pas d'obtenir une précision inférieure à quelques dizaines de millisecondes.

4.2.2 État de l'art des techniques de synchronisation dans les WSNs

Selon les exigences des applications, assurer une fonctionnalité de synchronisation de qualité est un défi. Plus précisément, les capteurs doivent recueillir des informations qu'ils transmettent ensuite au collecteur (ou la station centrale). Le collecteur doit recevoir les informations de tous les capteurs dans un délai minimal : c'est le problème de synchronisation

décrit dans [113]. Ceci a conduit, dans les réseaux informatiques traditionnels, à la conception de protocoles pour maintenir la synchronisation des horloges physiques. Un protocole tel que NTP (Network Time Protocol) [114] n'est pas un bon choix pour les WSNs en raison d'hypothèses non valides dans un WSN [115], car il réalise la synchronisation d'horloge du serveur central avec l'UCT (Universal Coordinated Time). De plus, même si la synchronisation est de haute précision, elle se fait au prix de la complexité des messages échangés [115].

Plus récemment, la norme IEEE-1588 [116] est devenue la nouvelle référence pour la synchronisation des horloges dans les applications industrielles, de par ses performances de dizaines de nanosecondes (10 ns – 75 ns). Mais, comme les réseaux sans fil sont limités en termes de puissance et présentent une grande complexité, la plupart des implémentations du protocole IEEE-1588 utilisées sur les réseaux câblés ne s'adaptent pas aux WSNs. Par conséquent, des travaux pour adapter le fonctionnement du protocole IEEE-1588 pour les réseaux de capteurs sans fil ont été réalisés. Ainsi, [117] présente des expérimentations et une évaluation de performances pour un protocole de synchronisation basé sur le standard IEEE-1588 pour des réseaux de capteurs sans fil. Les résultats montrent que la synchronisation entre l'horloge maître et les horloges esclaves des nœuds du réseau se réalise avec une précision de quelques centaines de nanosecondes (200 ns).

Plusieurs protocoles de synchronisation d'horloge ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil, avec des performances plus ou moins bonnes. Le RBS (Reference Broadcast Synchronization) [118] est le protocole le plus représentatif. En exploitant la propriété de diffusion de la communication sans fil, ce protocole est capable de réaliser la synchronisation d'un groupe de nœuds qui se trouvent à portée de communication d'un émetteur de référence. Les nœuds qui reçoivent le message de synchronisation, enregistrent l'heure de son arrivée et échangent cette information avec les autres. La précision pour la synchronisation de RBS, en présence de la technologie 802.11 et avec un estampillage du temps réalisé au niveau du noyau du système d'exploitation, est de l'ordre de la dizaine de microsecondes [118]. Le protocole TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) est une implémentation de la méthode de synchronisation "émetteur-récepteur". Dans [119], les auteurs implémentent le principe de TPSN sur une architecture de capteurs de type Berkeley Motes et proposent une procédure d'horodatage au niveau de la couche MAC. Cette méthode est capable de réduire efficacement le temps moyen d'accès au medium (l'erreur moyenne pour la précision de la synchronisation est de 16,9 μs). Le protocole FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol) proposé dans [120] est un autre protocole de synchronisation qui utilise la stratégie traditionnelle de synchronisation "émetteur-récepteur". Ce protocole est similaire à TPSN, dans la mesure où il réalise également une synchronisation de tous les nœuds du réseau à travers un nœud "root", mais en améliorant un certain nombre de défauts. Le nœud "root" est responsable de fournir le temps global dans le réseau et il est régulièrement élu d'une manière dynamique. La topologie du réseau est de type mesh, contrairement à TPSN où l'organisation du réseau est de type hiérarchique. Dans [121], les auteurs ont évalué le protocole FTSP dans un réseau de 64 éléments organisés dans une grille de 8×8, ce qui correspond à un réseau avec 7 sauts. Après environ 10 minutes, la synchronisation du réseau est réalisée avec une précision moyenne inférieure à 11.7 μs, d'où une erreur moyenne de 1.7 μs par saut si nous divisons par le nombre de sauts. Enfin, le protocole PBS (Pairwise Broadcast Synchronization) proposé dans [122] décrit une nouvelle approche de synchronisation, appelé

Receiver-Only Synchronization (ROS). La précision est similaire à celle obtenue pour le RBS (29.1 μs) sur la technologie Berkeley Motes. PBS nécessite un nombre réduit de messages pour chaque cycle de synchronisation, ce qui est un avantage en termes d'économie d'énergie.

En résumé, les WSNs offrent de grands avantages par rapports aux réseaux filaires classiques, mais aussi des limitations. Particulièrement celles reliées à la synchronisation des capteurs. Assurer une synchronisation précise des nœuds est un challenge qui s'ajoute à d'autres exigences. La principale est la limitation des ressources énergétiques. Cette contrainte à conduit à des études pour proposer des solutions pouvant garantir les services en utilisant un minimum d'énergie. Dans [123], un protocole de synchronisation d'horloge économique en énergie basé sur l'estimation de l'horloge décalée par rapport à horloge virtuelle.

Une solution appelée "post-facto Synchronisation" est proposée dans [124]. Elle se préoccupe, en plus de la synchronisation, de la minimisation de l'énergie consommée ; cette solution est basée sur l'idée qu'un message nommé "beacon" est envoyé en broadcast à tous les éléments du réseau, ce paquet étant utilisé par la suite comme une une base de temps qui servira pour le recalage ultérieur des nœuds capteurs. Dans la même idée, Tian et al. font une proposition de synchronisation cette fois-ci au niveau des couches physique et réseau : ils proposent d'intégrer une horloge idéale au niveau de la couche réseau [125]. Le travail se base sur la création d'un nouveau protocole de synchronisation au niveau réseau, basé sur la méthode de Time-Stamp Broadcast Synchronization (TSBS), qui est capable d'effectuer ses tâches avec moins d'énergie consommée.

Les avancées à propos de ce sujet contradictoire (synchronisation/économie d'énergie) sont assez récentes [126]. Dans [127] et [128], les auteurs proposent un nouveau système de synchronisation des horloges afin d'optimiser la consommation énergétique et comparent les résultats avec ceux du protocole TPSN. Pour répondre à la nécessité des nœuds mobiles et leur permettre de se synchroniser dans un réseau, [129] propose une solution hybride qui intègre les protocoles RBS et TPSN.

Synthèse :

Le Tableau 4.1 présente une comparaison entre les différentes solutions, discutées plus haut, en prenant en compte un certain nombre de paramètres, où N représente le nombre de paquets échangés dans un cycle de synchronisation et L le nombre de nœuds présents dans le réseau. En analysant le Tableau 4.1, nous pouvons constater que les protocoles qui ont une très bonne précision de synchronisation présentent une forte consommation en énergie, ou vice versa.

La satisfaction de ces deux besoins, la gestion d'énergie et la synchronisation, n'est pas une tâche aisée étant donné que les critères de performances sont opposés. Plus précisément, pour assurer une bonne synchronisation, le réseau va consommer une quantité importante d'énergie. Par conséquent, il va falloir trouver le compromis qui sera capable de garantir les performances ainsi qu'une longévité du réseau.

Notre proposition sera donc de mettre en œuvre une solution de synchronisation qui consistera en la distribution d'un bit de synchronisation qui déclenchera les convertisseurs

analogique/numérique présents sur les capteurs. Par la suite, nous proposons d'analyser la situation actuelle et de calculer le retard entre deux nœuds ZigBee.

Protocole	Toplogie	N^{bre} de messages/cycles	Précision	Couche	Consommation en énergie
IEEE-1588 [117]	Saut unique	4×N×L	50-200 ns	Application / Physique	Élevée
RBS [118]	Récepteur-Récepteur	N×L×2	29.1 μs	Application	Élevée
TPSN [119]	Émetteur-Récepteur	2×N×L	16.9 μs	MAC	Moyenne
FTSP [120]	Émetteur-Récepteur	N×L	1.7 μs	MAC	Faible
PBS [122]	Multisauts / saut unique	2×N	29.1 μs	Application	Faible

TABLE 4.1 – Tableau de comparaison et de synthèse des techniques de synchronisations discutées dans la littérature.

4.2.3 Mesure du décalage entre deux nœuds capteurs ZigBee au laboratoire

Afin de mesurer le décalage (le retard) entre deux nœuds ZigBee, nous avons fait une campagne de mesures. Un réseau de capteurs sans fil ZigBee en topologie étoile a été mis en place. Ce réseau est composé d'un coordinateur et de deux nœuds capteurs. Pour déterminer le retard entre les deux noeuds capteurs, on a procédé de la manière suivante :

Le Coordinateur envoi une impulsion en mode broadcast (tous les nœuds associés au réseau sont destinataires). Les nœuds capteurs reçoivent cette impulsion et sont connectés à un oscilloscope pour visualiser cette impulsion. La description de ce processus et une photo de ce principe de mesure sont présentées dans la FIGURE 4.1.

En réalisant un agrandissement (zoom) sur une impulsion dans l'oscilloscope, nous avons mesuré le retard entre les deux nœuds capteurs (FIGURE 4.2).

Nous avons effectué plusieurs essais et nous avons reporté les résultats obtenus dans le tableau 4.2. En analysant ces résultats, nous pouvons noter que le retard entre les deux nœuds capteurs varie de quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes. Ce retard est aléatoire d'un essais à l'autre, ainsi, il n'est pas envisageable de le calculer et de l'enlever dans la partie post-traitement. Il faut donc proposer une solution à ce problème qui est relié aux différentes couches du protocole ZigBee par lesquelles l'impulsion envoyée transite pour arriver à la couche application du récepteur.

Il existe un certain nombre de retards non déterministes pendant le transfert de messages

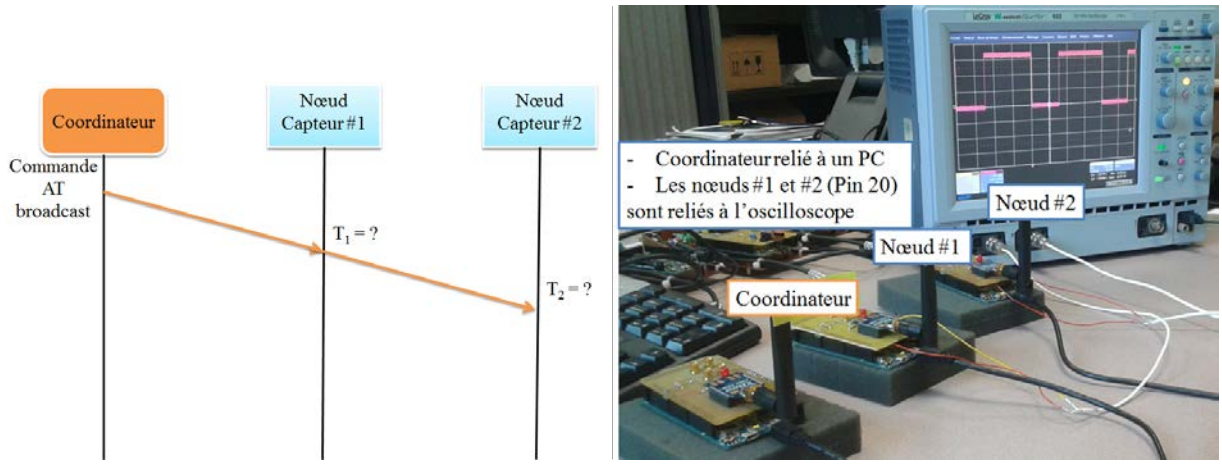


FIGURE 4.1 – Mesure du retard (décalage) entre deux nœuds capteurs dans un réseau ZigBee (XBee).

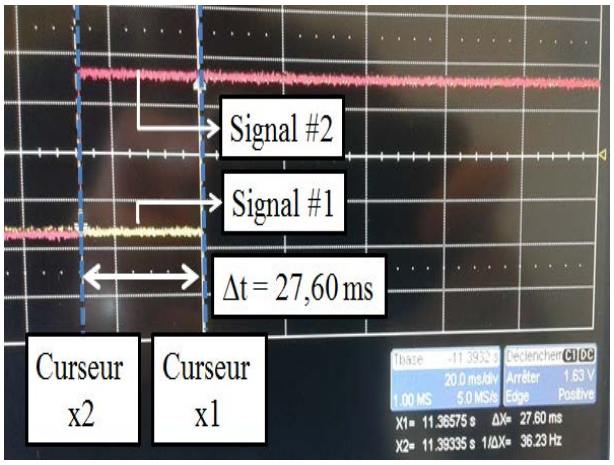


FIGURE 4.2 – Zoom sur l'oscilloscope pour visualiser le retard entre deux nœuds capteurs munis de modules XBee.

Test	T1 (s)	T2 (s)	△ t (ms)
Test ♯ 1	4.6991	4.7113	12.2
Test ♯ 2	11.36575	11.39335	27.60
Test ♯ 3	12.34485	12.3494	4.55
Test ♯ 4	19.7454	19.7475	12.1
Test ♯ 5	27.3531	27.3682	15.1
Test ♯ 6	34.7341	34.7670	32.9

TABLE 4.2 – Mesure du retard entre deux nœuds ZigBee (XBee) pour plusieurs tests.

entre les nœuds. Kopetz et Ochsenreiter [130] étaient les premiers à analyser la structure des retards des messages et à caractériser les composants du retard selon le procédé de livraison du message. Le retard dans la livraison de message peut être décomposé comme suit :

- **Temps d'envoi :** le temps de création du message au niveau de la couche application, il inclut aussi d'autres retards causés par le système d'explicitation lors du traitement de la demande d'envoi du message. Le temps est un temps non déterministe et peut aller jusqu'à quelques centaines de millisecondes, en fonction de la charge de travail du système.
- **Temps d'accès :** le temps d'attente pour accéder au canal après avoir atteint la couche MAC. Ce temps est le plus important et varie selon le protocole MAC utilisé. Le temps d'accès est non-déterministe et peut varier de quelques millisecondes jusqu'à quelques secondes, en fonction du trafic sur le réseau.
- **Temps de transmission :** le temps de transmettre un message à la couche physique. Ce retard peut être estimé à partir de la longueur d'un message et de la vitesse de propagation dans le milieu.
- **Temps de propagation :** il représente le temps réel pris pour transmettre un message de l'émetteur au destinataire par le canal sans fil. Le temps de propagation est déterministe et, en général, inférieure à 1 microseconde, ce qui est presque négligeable, en comparaison avec les autres composantes du retard.
- **Temps de réception :** c'est le temps nécessaire pour recevoir un message au niveau de la couche physique, qui est le même que le " temps de transmission ". Dans certains cas, ce délai est classé comme une partie du " temps d'acheminement ".
- **Temps d'acheminement :** le temps nécessaire pour construire et envoyer un message reçu à la couche d'application au niveau du récepteur. Il peut être considéré comme correspondant à l'élément " temps d'envoi " du côté de l'émetteur, et peut être variable dans le temps en raison des retards variables introduits par le système d'exploitation.

Il est à noter que le retard dans la transmission du message dépend aussi d'autres facteurs, tels que la plate-forme matérielle, le code de correction d'erreur et le schéma de modulation utilisé. Le retard de trajet décrit ci-dessus dans chaque composant est basé sur des modules utilisant le protocole ZigBee (XBEE PRO S2B).

La synchronisation des capteurs entre eux lors du prélèvement (échantillonnage) des données est une problématique parmi les plus importantes dans les systèmes SHM sans fil. Dans ce paragraphe, nous avons mesuré et calculé l'ordre de grandeur de l'erreur de synchronisation entre deux capteurs équipés par des modules XBee Pro S2B en faisant une étude avec un réseaux composé d'un coordinateur et de deux nœuds capteurs. Dans la section suivante, on propose d'utiliser un module dédié à la synchronisation basé sur le standard IEEE 802.15.4 (couche physique et MAC).

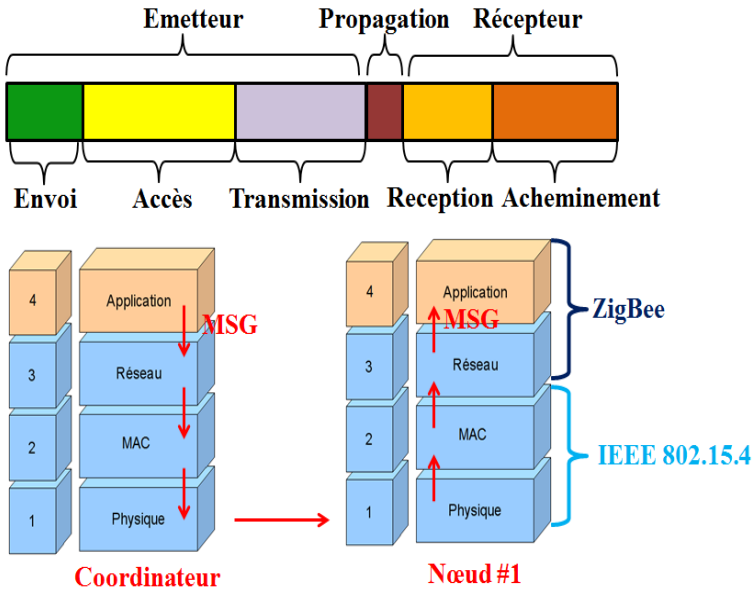


FIGURE 4.3 – Décomposition du retard de paquet dans une liaison sans fil ZigBee.

4.3 Proposition d'une solution de synchronisation précise, économique et flexible

Les spécifications discutées dans le chapitre précédent et les algorithmes de traitements des signaux collectés utilisés dans le chapitre deux ont fait remonter des besoins de prise de mesures quasi-synchrones, demande essentielle pour la validation de notre prototype-plateforme WSN pour le CSI des structures. Plus exactement, le décalage toléré entre deux prises de mesures sur deux capteurs différents du système doit être, pour les cas les plus contraints, petit devant les temps de propagation des ondes acoustiques entre les deux capteurs.

D'autre part, la mise en œuvre des horloges synchrones est particulièrement complexe car les tolérances imposées se situent à la limite de ce qu'offre aujourd'hui la littérature dans le contexte des réseaux d'instrumentation filaires. Pour résoudre ce problème différentes stratégies sont possibles : à titre d'exemple, le système GPS possède un mécanisme de synchronisation d'horloge interne du récepteur avec le temps fourni par les satellites. Les satellites GPS envoient des signaux pilotés par une horloge atomique d'une très grande précision. Les récepteurs incluent une horloge à quartz qui est moins stable, et les mesures de signaux corrigent les dérives d'horloges. Des mesures réalisées avec des récepteurs au sol montrent qu'une synchronisation de l'ordre de quelques nanosecondes est possible [131]. Bien que les performances des solutions utilisant les signaux GPS soient précises et correspondent à nos besoins, elles sont écartées pour des raisons de coût et de contraintes liées à l'application (environnement de déploiement).

Après avoir rappelé les différentes solutions de synchronisation existantes dans la littérature (section 4.2.2), et après avoir discuté les performances d'une simple distribution d'un

bit de synchronisation à travers le réseau ZigBee par le module de communication, nous nous tournons vers la proposition d'une solution qui consistera en la distribution d'un bit de synchronisation à travers un standard plus souple et dédié uniquement à cette tâche. Cette solution est détaillée dans le paragraphe suivant.

4.3.1 Description de la solution proposée

Une grande partie des protocoles de synchronisation développés dans la littérature est basée sur un échange de plusieurs messages entre les nœuds du réseau et nous avons constaté que les protocoles qui présentent une très bonne précision de synchronisation imposent une consommation d'énergie trop élevée. On a vu précédemment que l'utilisation intensive des modules radio pour l'envoi de ses messages augmente considérablement la consommation d'énergie des nœuds.

Dans le cas de notre application, la contrainte de synchronisation est indispensable uniquement lors de l'étape de prélèvement des données (échantillonnage). Ainsi, nous proposons un module de synchronisation sans fil basé sur la norme IEEE 802.15.4 pour répondre à cette exigence. Un dispositif maître-esclave inclut dans la station de base (coordinateur-maître) envoie une impulsion de synchronisation aux autres nœuds du réseau (esclaves). Ces modules de synchronisation ont une caractéristique qui consiste à agir lors de la détection d'énergie dans leur bande de fréquence (2.4 GHz). Les principaux éléments du retard entre les différents nœuds, dans le protocole ZigBee, viennent de ses différentes couches réseau. L'appel des fonctions peut retarder l'ordre de la détection d'impulsions dans la couche physique.

Cette solution est un appel direct à partir de la couche physique à la couche application, évitant toutes les autres couches intermédiaires. Les modules esclaves génèrent une interruption au moment précis où ils détectent l'énergie dans leur bande de fonctionnement. L'interruption est suivi immédiatement par le microcontrôleur et des échantillons sont prélevés et stockés. En supprimant les différentes couches de communication du protocole ZigBee, l'impulsion d'énergie qui marque la synchronisation est beaucoup plus rapide et ne nécessite aucun traitement supplémentaire. Une impulsion synchronisera donc l'activation de tous les ADC présents dans les nœuds esclaves. Ainsi, tous les ADC commenceront leurs mesures avec une erreur minimale de datation.

4.3.2 Évaluation de la solution proposée

Afin d'évaluer la solution de synchronisation proposée en terme de précision, on propose une expérience simple qui consiste à réaliser un réseau sans fil en topologie étoile composé par trois nœuds : un nœud maître et deux nœuds esclaves. La communication de l'impulsion de synchronisation est basée sur le standard IEEE 802.15.4 à 2.4 GHz (il inclut les couches physique et MAC seulement). Le nœud maître transmet sur le réseau un bit en mode broadcast toutes les 5 minutes. À la détection de l'énergie dans la bande de fréquence 2.4 GHz, au niveau des nœuds esclaves, une interruption est générée. Cette interruption qui consiste

à changer l'état d'une broche (en l'occurrence ici broche 2 de la carte Arduino Due) est suivie par le microcontrôleur. L'état de cette broche est visualisé à l'oscilloscope pour les deux nœuds esclaves. Ainsi, on calcule l'erreur entre les instants de changement d'état des deux nœuds esclaves. Le principe et la méthodologie suivie pour la mesure de l'erreur de synchronisation entre les deux nœuds esclaves sont décrits dans la FIGURE 4.4.

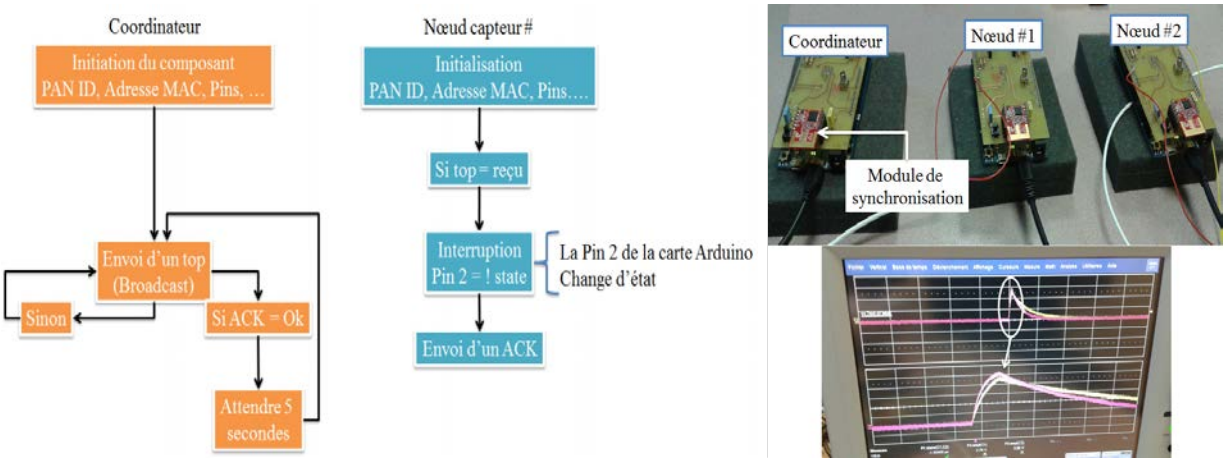


FIGURE 4.4 – Mesure de l'erreur de synchronisation entre deux nœuds capteurs.

Le nœud maître (coordinateur) transmet donc un bit en mode broadcast toute les 5 secondes. Pour une durée de 100 s, nous avons enregistré les paramètres suivants :

- **Retard** (C_1, C_2) **:** qui représente le retard entre le d'état au niveau du nœud ♯1 et le changement d'état au niveau du nœud ♯2. Il est exprimé en nanosecondes.
- **Moyenne :** c'est la moyenne calculée en fur et à mesure des retards entre les deux nœuds.
- **Min :** représente le retard minimale mesuré.
- **Max :** représente le retard maximale mesuré.
- $\mathbf{S}_{dev}$ **:** représente la déviation standard des valeurs de retard mesurées.

Les paramètres : Retard (C_1, C_2), Moyenne, Min, Max et S_{dev} sont exprimés en nanosecondes. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 4.3.

Retard (C_1, C_2) (ns)	Moyenne (ns)	Min (ns)	Max (ns)	S_{dev} (ns)	Temps (s)
-7	-7	-7	-7	/	5
23	8	-7	23	15	10
-28	-4	-28	23	20.9284	15
8.69	-826.3 $\times 10^{-}3$	-28	23	18.9399	20
24	4.1390	-28	24	19.6364	25
10	5.1158	-28	24	18.0581	30
-50	-2.7579	-50	24	25.5241	35

TABLE 4.3 – Calcul de l'erreur de synchronisation entre deux nœuds capteurs.

Nous avons ensuite refait la même expérience pendant une durée de 350 s et nous avons tracé la déviation standard (S_dev) en fonction du temps.

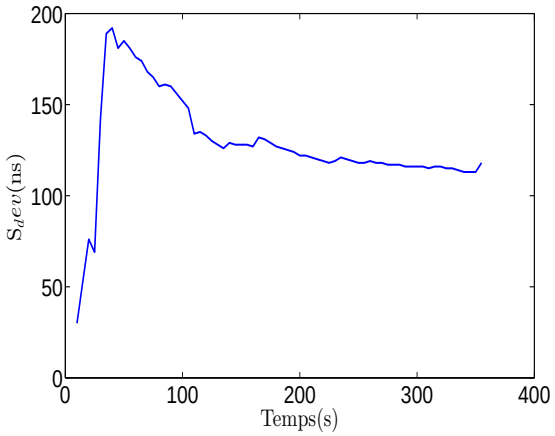


FIGURE 4.5 – Variation de l'erreur de synchronisation (S_{dev}) entre les deux nœuds capteurs en fonction du temps.

La FIGURE 4.5 représente l'évolution de la déviation standard (variation de l'erreur de synchronisation) en fonction du temps. Sur ce graphique, on constate que cette variation est élevée au début de l'expérience : t < 50 s et se stabilise après : t = 200 s. Cette variation change entre 30 et 192 ns et sa valeur moyenne et de 128.4714 ns.

On peut conclure de cette expérience que l'erreur de synchronisation est diminuée de quelques dizaines de millisecondes, dans le cas d'une distribution d'un bit de synchronisation via le protocole ZigBee à quelques centaines de nano-secondes avec notre solution. Nous allons montré par la suite que cette erreur est acceptable dans le cadre de notre application et validé cette solution en faisant une comparaison entre une transmission filaire et une transmission sans fil en utilisant la plateforme développée.

4.4 Description du prototype plateforme de WSN développé

En se basant sur les différents systèmes classiques et plateformes de réseaux de capteurs commerciales disponibles (présentées dans le chapitre un), nous avons défini les exigences et problématiques auxquelles la nouvelle plateforme de WSN doit répondre. Selon les contraintes et les premiers tests préliminaires, la fréquence de la réponse active de la structure est définie pour être autour de 50 kHz. En outre, la fréquence d'échantillonnage maximale de la plateforme d'acquisition est de 1 MHz. Des transducteurs piézoélectriques de mêmes caractéristiques que ceux présentés et utilisés dans les expériences exposées dans le chapitre deux sont choisis comme les unités de captage. Concernant l'unité d'acquisition de données, elle doit inclure un convertisseur analogique numérique d'une résolution de 12 bits.

Comme rappelé dans le chapitre trois, un système SHM sans fil est composé essentiellement de deux parties : les unités de mesures et la station de base. Le prototype de la plateforme de WSN développé dans le cadre de ce travail est présenté dans la FIGURE 4.6.

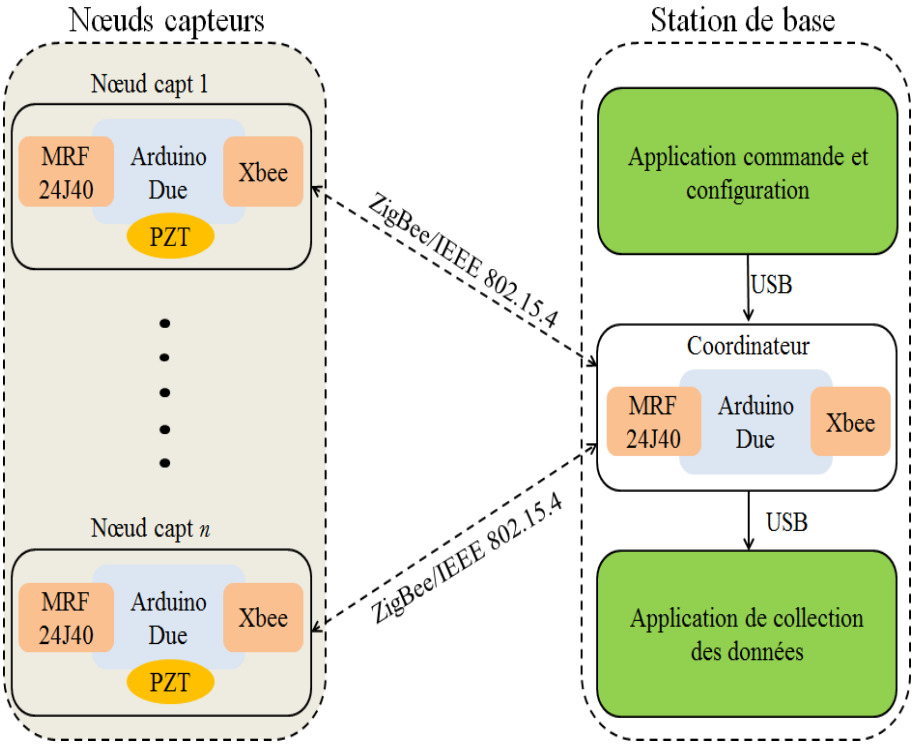


FIGURE 4.6 – Vue d'ensemble de l'architecture de la plateforme WSN développée.

Notre système de CSI sans fil inclut deux composants principaux : un nœud central (coordinateur) connecté à un ordinateur, l'ensemble est appelé station de base, et des nœuds capteurs. La station de base contient le hardware et software nécessaires pour la configuration du réseau, transmission des paramètres de mesure, transmission du top de synchronisation et la réception des données. Les nœuds capteurs disposent du software nécessaire pour comprendre les instructions de mesure, l'acquisition des données et les capteurs appropriés pour les mesures.

Les nœuds sans fil pour l'acquisition des mesures et le système global ont été conçus pour répondre aux exigences de notre application SHM. Le système garantit les mêmes résultats que ceux des systèmes filaires avec les avantages des systèmes sans fil. Dans cette section, les différents modules du système sont décrit en détail. Les différents éléments composant chaque nœud capteur sont montrés dans la FIGURE 4.7. Chaque nœud capteur inclut une unité d'alimentation, un module d'acquisition (carte Arduino Due (a)), une carte de conditionnement de signal (b), un module de communication sans fil (module XBee (c)), un module de synchronisation (MRF24J40 (d)) et un transducteur piézoélectrique (e).

Unité d'alimentation :
Dans les systèmes filaires, l'alimentation du nœud capteur peut être assurée par un fil data

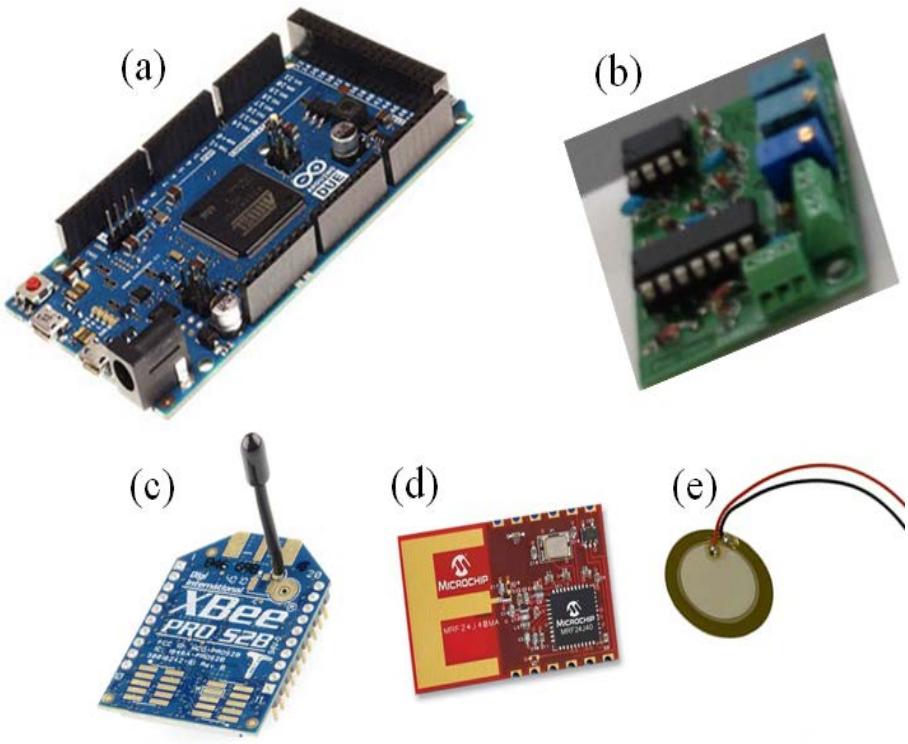


FIGURE 4.7 – Les éléments composants chaque nœud capteur du prototype WSN développé. (a) Plateforme Arduino Due. (b) Circuit de conditionnement. (c) Module Xbee PRO. (d) Module MRF24J40. (e) Transducteur piézoélectrique.

ou un câble dédié. Les systèmes sans fil doivent utiliser des batteries, et leur durée de vie doit être surveillée.

Dans notre prototype, chaque nœud capteur dispose de deux modes d'alimentation : via un connecteur USB ou avec une alimentation externe. Le mode d'alimentation est sélectionné automatiquement. L'alimentation externe peut provenir soit d'un adaptateur AC-DC ou de la batterie. L'adaptateur peut être connecté en branchant une prise 2.1 mm dans la prise d'alimentation. Les fils provenant de la batterie peuvent être insérés dans les en-têtes GND et V_{in} du connecteur d'alimentation.

Les nœuds peuvent fonctionner avec une alimentation externe de 6 à 20 volts. Quand l'alimentation fournie est inférieure à 7 v, la carte peut devenir instable. Quand une alimentation de plus de 12 v est fournie, le régulateur de tension présent sur les cartes peut surchauffer et endommager les cartes électroniques. La plage recommandée est donc 7 à 12 volts. Une alimentation de 3,3 v est générée par le régulateur. La consommation maximale de courant est de 800 mA. Ce régulateur fournit également l'alimentation du microcontrôleur.

Module d'acquisition :
Le module d'acquisition est le composant critique des systèmes de mesure actuels. Chaque nœud est basé sur une carte Arduino Due. Cette carte inclut un microcontrôleur Atmel

SAM3X8E ARM Cortex-M3 qui comporte un convertisseur analogique-numérique 12 bits (ADC). La fréquence d'échantillonnage peut en principe atteindre 1 MHz. Un multiplexeur permet d'utiliser jusqu'à 12 entrées analogiques (bornes A0 à A11). Les tensions appliquées à ces entrées doivent être comprises entre 0 et 3,3 V. Lorsque le gain de l'amplificateur d'entrée est égal à 1, cette plage de tension donne des nombres compris entre 0 et 4096.

En plus des transducteurs, nous avons également besoin d'un circuit de conditionnement de signal avant d'appliquer le convertisseur analogique numérique. Le circuit de conditionnement de signal peut être appelé aussi l'interface du transducteur. L'objectif de cette interface de conditionnement est de modifier et décaler le signal électrique en sortie du transducteur pour l'adapter à la plage d'entrée du convertisseur analogique numérique qui est dans notre cas 0-3.3 v.

Module de synchronisation :
Pour répondre à la contrainte de synchronisation, nous proposons un module dédié uniquement à cette tâche. Ce module est basé sur la norme IEEE 802.15.4. Il dispose d'une interface de communication série SPI, il fonctionne dans la bande de fréquence ISM 2.405-2.48 GHz, débit de 250 kbps et une sensibilité de -95 dBm. Ce module est caractérisé par une basse consommation :

- mode RX : 19 mA ;
- mode TX : 23 mA ;
- mode veil : 2μ A.

Module de communication sans fil :
Comme nous l'avons rappelé dans l'introduction, les systèmes filaires souffrent de quelques inconvénients que les systèmes sans fil tentent de résoudre : le coût du câblage, le déploiement des systèmes sur les structures surveillées, etc.

Le système proposé dans ce manuscrit utilise le protocole ZigBee pour les communications entre les nœuds capteurs installés sur la structure et la station de base. Ce protocole utilise une bande ISM qui ne nécessite pas de licence. Une interface basée sur le standard IEEE 802.15.4 est dédiée uniquement à l'envoi des tops de synchronisation.

Le nœud capteur sans fil dispose d'une interface sans fil connectée à la carte principale (Arduino Due) équipée des pilotes pour contrôler et configurer le périphérique. De la même manière, la station de base comporte une interface sans fil avec une capacité de créer le réseau, et d'y associer d'autres entités. La station de base (Coordinateur) agit donc comme un point d'accès et tous les autres nœuds se connectent à ce point d'accès. Une fois les nœuds associés au réseau, ils sont prêts à recevoir des instructions, envoyer leurs données sur un canal ZigBee.

En ce qui concerne la station de base et comme mentionné précédemment, elle inclut un module synchronisation, une plateforme Arduino et ne contient pas de transducteur piézoélectrique. Elle inclut également un module de communication XBee PRO S2B qui agit et dispose des fonctionnalités coordinateur du WSN en plus des commandes, configurations et la collection des données. Le rôle du coordinateur est de configurer et de synchroniser les différents capteurs en utilisant une application dans le protocole de communication ZigBee/IEEE 802.15.4. Le coordinateur agit également comme une interface entre le réseau de capteurs et l'application de commande et configuration, ainsi qu'un point de réception des données

transmise par les nœuds capteurs. L'application de commande et configuration permet de contrôler à distance des paramètres de configuration de l'acquisition (nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage, etc.).

Un module de gestion est inclut dans la station de base. Il permet de créer toutes les connections dans le système, par exemple entre les nœds capteurs et la station de base, l'envoi des instructions et du top de synchronisation, réception des mesures via le coordinateur. Il permet aussi de générer le fichier résultat après traitement des mesures.

La communication dans ce premier prototype de WSN est réalisée en configuration mono-saut. Le fonctionnement du système consiste en des balises envoyées par le nœud coordinateur aux différents nœuds capteurs. Une fois les nœuds sont alimentés, ils rentrent dans un mode "Idle". À partir de l'application commande et configuration est envoyée une balise en mode "broadcast" pour initier le processus d'échantillonnage qui est à sont tour contrôlé par une balise de synchronisation. Puis, les informations recueillies sont enregistrées localement dans chaque nœud capteur. Le processus de communication commence à ce moment et consiste à transmettre les données enregistrées (balise get) de chaque nœud. Les détails sur le processus de synchronisation sont données dans la section 4.2. Les détails sur le processus de communications sont exposés dans la section 4.5.2. Le schéma de gestion du réseau est résumé dans la FIGURE 4.8.

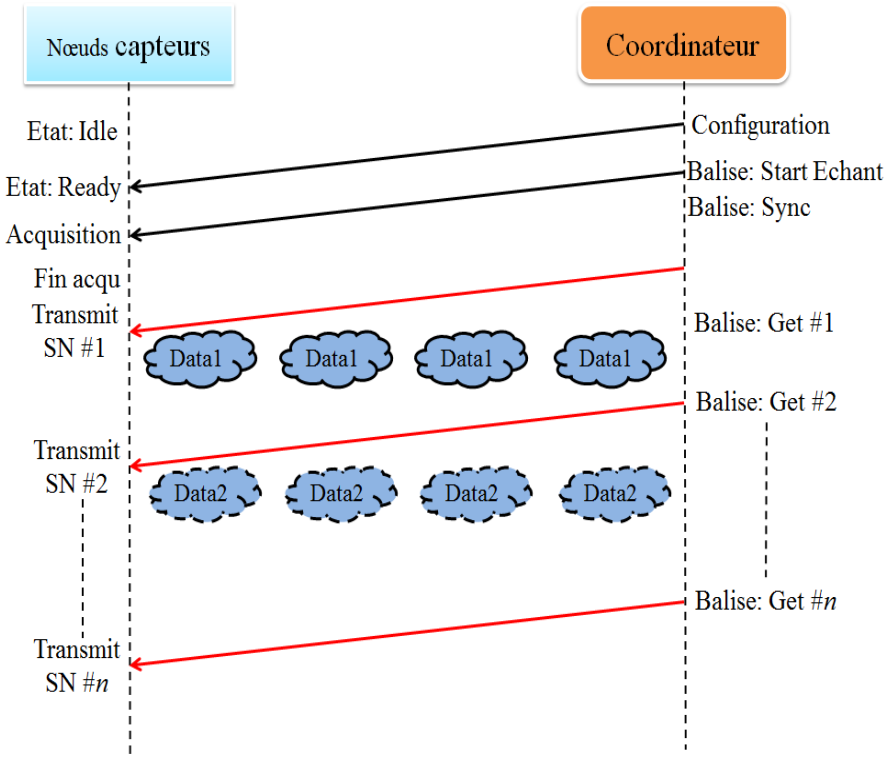


FIGURE 4.8 – Schéma simplifié de la gestion du réseau.

Les données sont transmises des nœuds capteurs vers le coordinateur dans des messages successifs contenant les différentes mesures et identifiants. Toutefois, l'application dévelop-

pée est également en charge de l'interprétation et de la conversion en unités standard des données reçues, ainsi que leur stockage local dans la station de base. L'apparence finale de la plateforme prototype est représentée sur la FIGURE 4.9.

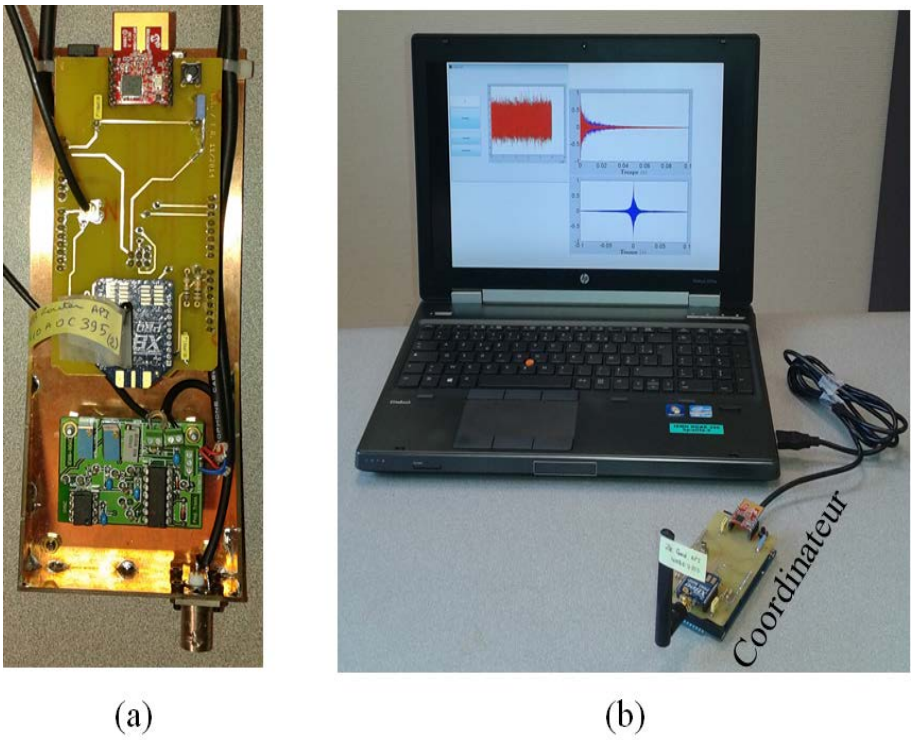


FIGURE 4.9 – Apparence finale de la plateforme prototype développée. (a) nœud capteur. (b) station de base.

4.5 Validation du prototype développé : Démonstrateur CSI-ZigBee à détection passive

Après avoir présenté les différents modules composants notre plateforme de communication et décrit le fonctionnement du système, nous allons nous concentrer sur les performances du système globale. Dans un premier temps, nous proposons de faire une comparaison entre une transmission filaire et une transmission sans fil réalisée avec la plateforme développée. Cela nous permettra de valider notre solution de synchronisation et de quantifier son erreur. Ensuite, nous présenterons les algorithmes de communication et les trames échangées dans le réseau. Enfin, nous validerons le fonctionnement du système globale en le déployant sur un échantillon de rail pour la détection d'un éventuel défaut.

4.5.1 Comparaison entre une transmission filaire et une transmission sans fil réalisée avec la plateforme prototype développée

Pour une validation au laboratoire du bon fonctionnement de la plateforme de communication sans fil des tests ont été réalisés. L'objectif de cette expérience est de comparer des mesures effectuées avec le système utilisé dans le chapitre deux (système filaire câble GPIB) avec des mesures réalisées en utilisant la plateforme sans fil développée.

Pour le système sans fil, une topologie en étoile composée de deux nœuds capteurs et un nœud coordinateur est configurée.

Dans les deux cas d'expérience, trois transducteurs piézoélectriques comme ceux utilisés et décrits dans le chapitre deux sont collés sur le patin du rail aux points E, R_1 et R_2. La distance entre deux transducteurs consécutifs est $d = 10$ cm. Un générateur de fonctions aléatoires est utilisé pour générer le signal d'excitation au niveau du transducteur E. Les signaux reçu par les transducteurs aux points R_1 et R_2 sont mis en forme par le circuit de conditionnement. Le transducteur E est excité par un signal électrique $s_0(t)$ qui correspond à un train d'impulsions sinusoïdales d'un cycle à 50 kHz et une amplitude 2 v. La fréquence d'échantillonnage est configurée à 200 kHz.

Dans le cas du système filaire, les signaux conditionnés sont affichés sur un oscilloscope qui est relié à un ordinateur avec un lien filaire (câble GPIB). La synchronisation des capteurs R_1 et R_2 est réalisée par un fil.

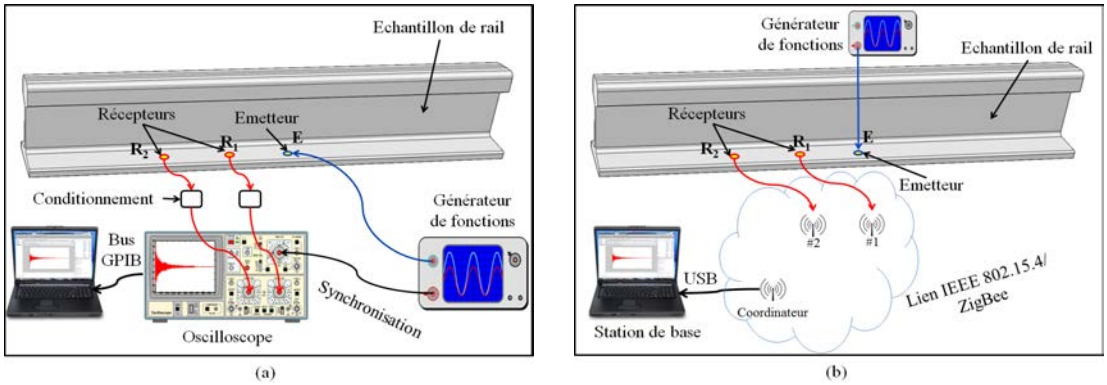


FIGURE 4.10 – Dispositif expérimental. (a) Expérience avec système filaire. (b) Expérience avec système sans fil.

Dans le cas de l'expérience avec le système sans fil développé, les signaux mis en forme par les cartes de conditionnement sont échantillonnés, numérisés par les modules d'acquisitions, ensuite transférés au module de communication sans fil présent dans chaque nœud. Ce dernier envoi les données numérisées au nœud coordinateur sous forme de trames sur un canal ZigBee. Le coordinateur à son tour les transfère vers la station de base par communication série (USB). Les échantillons reçus par la station de base sont enregistrés pour le traitement. Le module de gestion présent dans la station de base contient des fonctions qui permettent de reconstituer les signaux envoyés par les nœuds capteurs. Le dispositif expérimental utilisé pour ces deux

expériences est décrit en détail dans la FIGURE 4.10.

Dans les FIGURES 4.11, les signaux reçus par l'ordinateur sont représentés pour les deux scénarios de mesure. Pour une meilleure visualisation, des signaux d'une durée de 0.6 ms sont représentés.

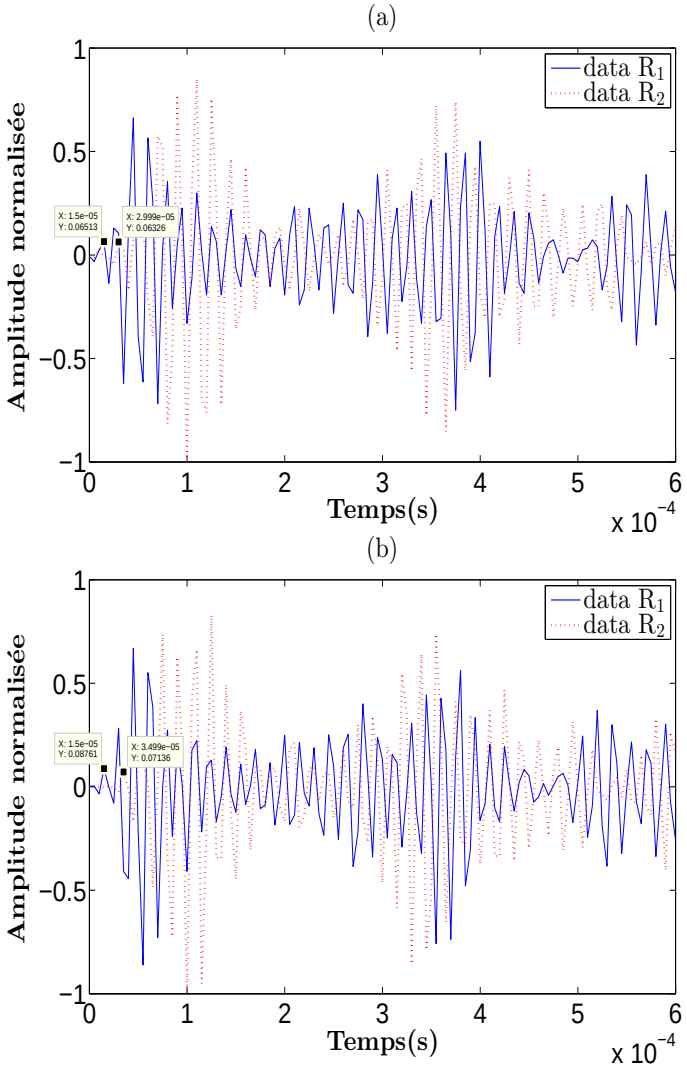


FIGURE 4.11 – Signaux reçus au niveau de l'ordinateur (station de base). (a) Signaux obtenus avec le système filaire. (b) Signaux obtenus avec le système sans fil

Dans les FIGURES 4.11, on peut constater que les paquets d'ondes sont identiques. Pour les deux scénarios, le premier pic du signal R_1 arrive à $t_1 = t_1^{'} = 1.5 \times 10^{-6}$ s. Ce temps correspond à la propagation de l'onde acoustique du transducteur E au transducteur R_1. Toutefois, pour la configuration filaire (FIGURE 4.11.a) le premier pic du signal R_2 arrive à $t_2 = 2.999 \times 10^{-5}$s, alors que dans le cas de la plateforme sans fil (FIGURE 4.11.a) ce premier pic arrive à $t_2^{'} = 3.499 \times 10^{-5}$s.

On peut calculer les quantités suivantes :

le temps de propagation des ondes acoustiques du point R_1 au point R_2 dans le scénario filaire :

$$\triangle t = t_2 - t_1 = 1.499 \times 10^{-5}\ s, \tag{4.1}$$

le temps de propagation des ondes acoustiques du point R_1 au point R_2 (plus une erreur Err) dans le scénario sans fil.

$$\triangle t^{'} = t_2^{'} - t_1^{'} = 1.999 \times 10^{-5}\ s, \tag{4.2}$$

cette erreur est calculée par :

$$\|Err\| = \| \triangle t - \triangle t^{'} \| = 5 \times 10^{-6}\ s. \tag{4.3}$$

On conclut de cette expérience que la communication sans fil des signaux reçus par les transducteurs R_1 et R_2 vers la station de base est réalisée avec succès.

En effet, le temps de propagation des ondes acoustiques du point R_1 au point R_2 est $\triangle t = 1.499 \times 10^{-5}$s, si on considère que la transmission par système filaire est parfaite. Le système sans fil nous permet d'arriver aux mêmes résultats avec une erreur de 5μs qui correspond à T_e ($F_e = 200$ kHz). Cette erreur est acceptable car elle représente une erreur sur un échantillon parmi les 12000 constituants le signal (0.0083%). De plus elle est négligeable devant les temps de propagation du point R_1 au point R_2. Cette erreur peut être justifiée par l'erreur de synchronisation et le temps de conditionnement qui ne sont pas déterministes.

4.5.2 Algorithmes et trames échangées dans la plateforme de communication sans fil

Dans cette section, nous nous proposons de décrire d'une façon détaillée les algorithmes de communication et les trames échangées dans le réseau par les différents nœuds.

La solution ZigBee est exploitée à une fréquence centrale de 2.4 GHz. Les caractéristiques techniques du protocole ZigBee ont été rappelées dans le chapitre trois. La fréquence de 2.4 GHz est la plus intéressante du fait qu'elle offre 16 canaux opérationnels avec le plus haut débit (250 kb/s) et utilisable partout dans le monde.

Trois topologies sont supportées par le protocole ZigBee : étoile, point-à-point et topologie maillée. Bien que ces trois topologies soient envisageables, la solution étoile parait être préférable à notre situation : prototype de laboratoire, couvrir un rail de 2 m, un petit nombre de nœuds, le traitement est déporté vers un point unique. De plus, cette topologie est très simple et rapide à déployer. Néanmoins, pour une configuration plus linéaire telle que l'impose le rail dans sa configuration définitive, il faudra privilégier la topologie point-à-point qui sera capable de remonter les informations jusqu'au centre de traitement grâce à la communication multi-sauts.

Après avoir rappelé le contexte et les caractéristiques du protocole de communication choisi, nous nous concentrons sur les algorithmes de communication et trames échangées

dans le réseau. Nous considérons une architecture constituée par deux nœuds capteurs et un nœud coordinateur comme présentée dans la FIGURE 4.10.b.

a). Algorithme de fonctionnement du coordinateur

Dans un premier temps, il y a la phase d'initialisation du composant, création du réseau (PAN ID, topologie, association de nouveaux nœuds, etc.). Une fois le réseau créé et configuré, le nombre d'échantillons désiré est envoyé via l'application en mode broadcast en utilisant le module de communication sans fil. Par la suite, un top de synchronisation est à son tour envoyé en broadcast. Celui-ci déclenchera la fonction d'échantillonnage. Pour collecter les différents signaux prélevés, des commandes de récupération des données sont envoyées pour chaque nœud. Les signaux collectés par le nœud coordinateur sont transférés vers l'ordinateur pour enregistrement et traitement. L'algorithme de fonctionnement du coordinateur est présenté dans la FIGURE 4.12.

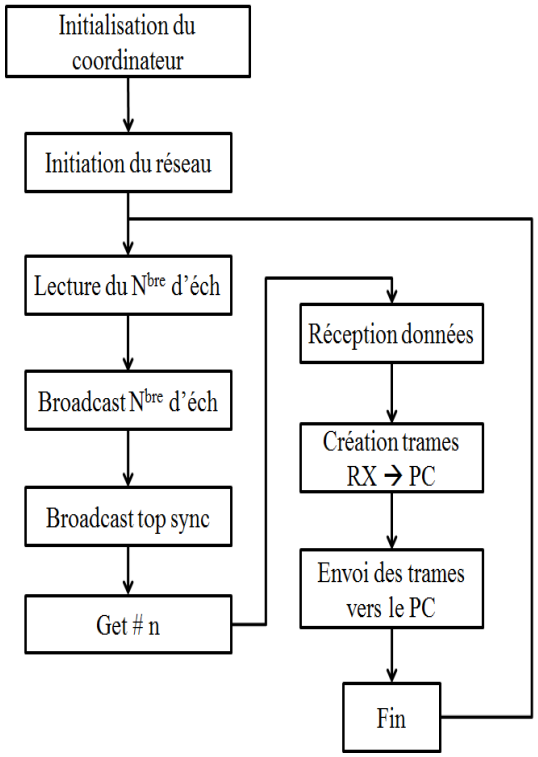


FIGURE 4.12 – Algorithme de fonctionnement du coordinateur.

b). Algorithme de fonctionnement des nœuds capteurs

Chaque nœud capteur doit se connecter au réseau en utilisant une commande d'association. Une adresse réseau est attribuée pour chaque nœud. Une fois le nombre d'échantillons reçu, le nœud est prêt pour prélever le signal. Le prélèvement du signal est déclenché par

le top de synchronisation. Le signal est échantillonné avec une résolution de 12 bits et les échantillons sont ensuite enregistrés localement. Pour être envoyés vers le coordinateur, les échantillons prélevés sont transférés vers le module radio. Cette tâche est déclenchée par une commande de récupération des données (Get#) envoyée par le coordinateur. L'algorithme de fonctionnement des nœuds capteurs est résumé dans la FIGURE 4.13.a. La FIGURE 4.13.b détaille l'algorithme d'échantillonnage qui est inclut dans chaque nœud capteur.

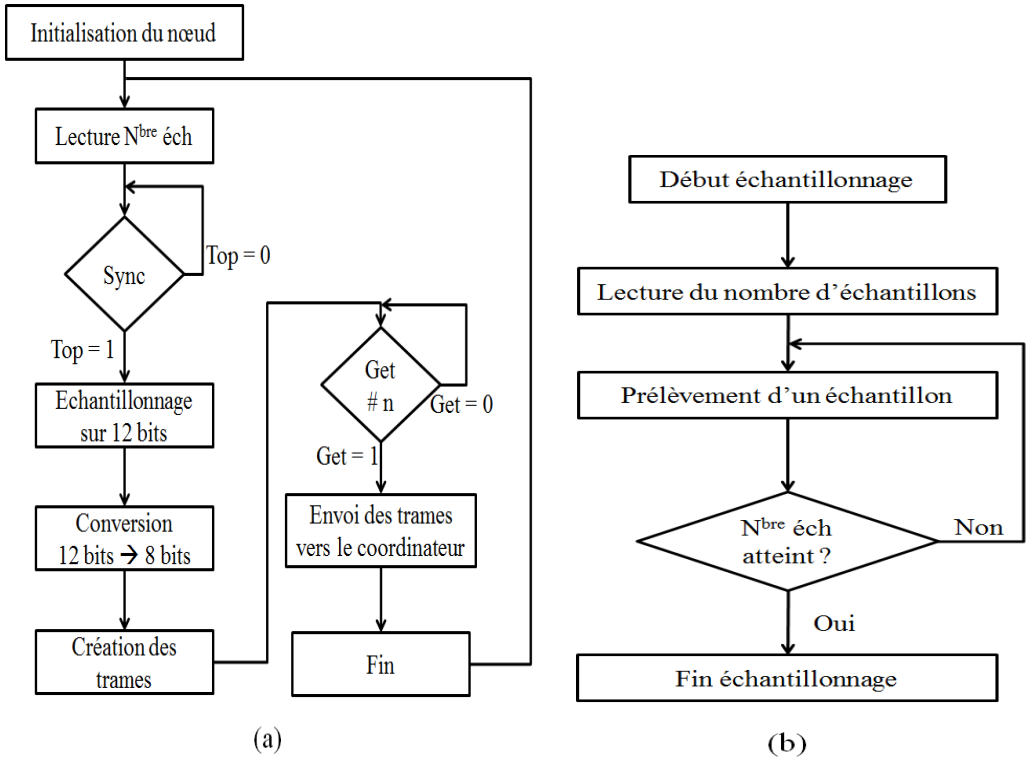


FIGURE 4.13 – Diagramme de fonctionnement des nœuds capteurs. (a) algorithme de fonctionnement de chaque nœud capteur. (b) algorithme d'échantillonnage.

Les données des capteurs sont volumineuses et ne peuvent être transmises en une seule trame. Ces données sont transmises par le module de communication sans fil vers le coordinateur sous forme de plusieurs tableaux. L'algorithme de création de ces trames (TX → RX) au sein de chaque nœud est détaillé dans la FIGURE 4.14 et le format des trames est donné dans la FIGURE 4.15. Les trames RX → PC sont celles reconstruites au niveau du coordinateur et formatées pour être envoyées vers l'ordinateur avec :

- **0x48 0x59 :** start delimiter, code hexadécimal (72 89) qui marque le début de chaque tableau. Il est codé sur 2 octets ;
- **ID capt :** identifiant du capteur codé sur 1 octet ;
- **NB éch :** nombre d'échantillon codé sur 2 octets ;
- **NB tot tab :** représente le nombre de tableau total codé sur 1 octet ;
- **NB actu tab :** numéro du tableau actuel codé sur 1 octet ;
- **data :** les données utiles codées sur 39 octets. Chaque échantillon est codé sur 1 octet.

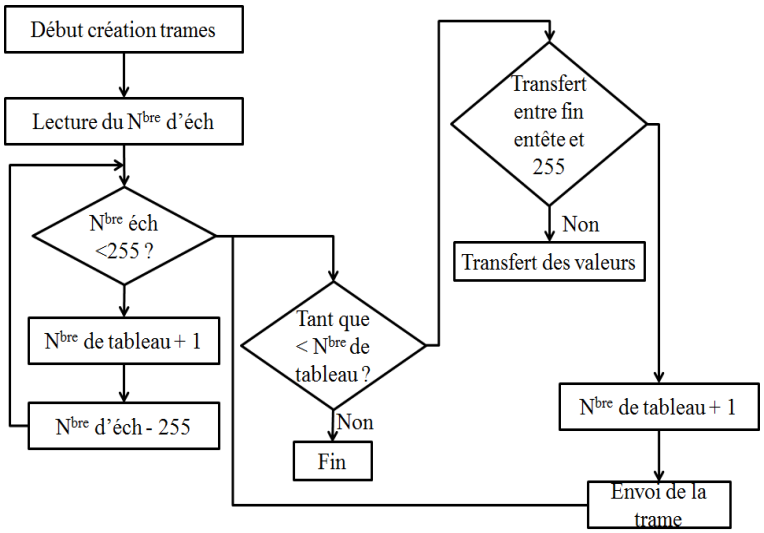


FIGURE 4.14 – Algorithme développé pour la création des trames TX → RX.

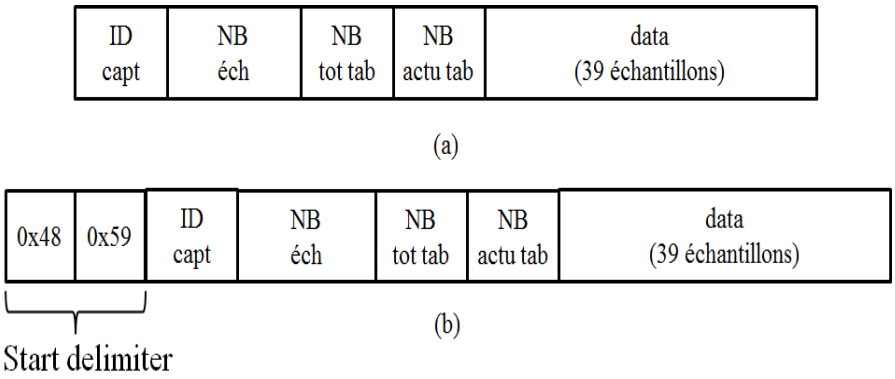


FIGURE 4.15 – Format des trames de données. (a) format d'une trame TX → RX. (b) format d'une trame RX → PC.

4.5.3 Application à la détection passive de défaut

Dans le chapitre deux section 2.4, nous avons étudié et déterminé les conditions expérimentales d'une reconstruction effective de la réponse active du rail entre deux points de mesure. Ceci en estimant la fonction de corrélation des champs de bruit mesurés en ces deux points, comme prédit théoriquement par l'équation (2.21), exposée dans le chapitre deux section 2.3. En faisant une comparaison entre une expérience d'émission-réception active et une expérience de corrélation de bruit, nous avons montré qu'une bonne qualité de reconstruction de la réponse active peut être atteinte, à condition que le nombre d'acquisitions et de sources de bruit distribuées sur l'échantillon inspecté soient suffisants. Pour isoler l'effet d'un défaut local sur les fonctions de corrélation de bruit estimées, nous avons utilisé l'approche connue sous le nom "baseline subtraction" : qui consiste en la différence des formes d'onde entre l'état de référence et l'état en présence de défaut.

L'objectif de cette sous-section est de démontrer la faisabilité du système de contrôle-santé intégré sans fil basé sur la technologie ZigBee pour le transfert des données des capteurs vers la station de base et la technique de corrélation de bruit acoustique pour une détection passive de défaut. Afin de valider le fonctionnement du système développé, nous allons appliquer l'approche : "baseline subtraction" sur les formes d'onde reconstruites par corrélation de bruit avec les signaux collectés par la station de base.

Description de l'expérience :

Deux nœuds capteurs et un nœud coordinateur sont déployés sur l'échantillon de rail de longueur 2 m dont une section transversale est présentée dans le chapitre deux section 2.4. Les nœuds capteurs sont placés aux points A et B. Le nœud coordinateur placé à une distance de quelques mètres du rail est relié à un ordinateur. Les deux transducteurs A et B sont utilisés comme récepteurs acoustiques et sont reliés aux nœuds sans fil.

Pour générer le bruit acoustique dans l'échantillon de rail, dix transducteurs piézoélectriques du même type que ceux utilisés précédemment, collés sur le patin du rail à des positions S_i sont alimentés successivement par un générateur de bruit aléatoire. Les signaux reçus par les transducteurs aux points A et B sont mis en forme, numérisés et transmis vers le coordinateur par un lien sans fil ZigBee. Les signaux reçus par le coordinateur sont ensuite transférés vers la station de base (ordinateur) par communication série (USB). Le dispositif expérimental utilisé pour ces mesures est détaillé dans la FIGURE 4.16.

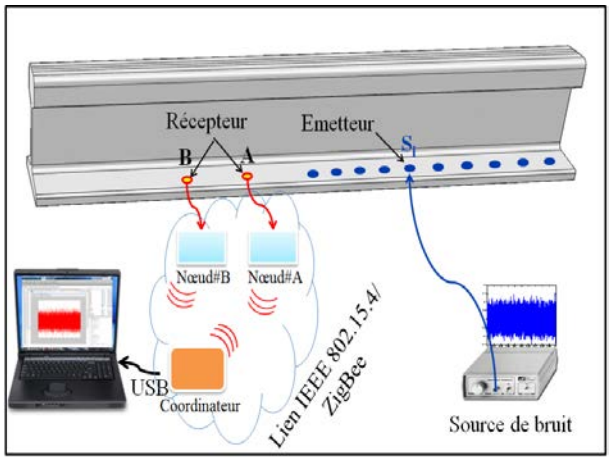


FIGURE 4.16 – Dispositif expérimental pour la mesure des intercorrélations de bruit. Les transducteurs A et B sont utilisés comme récepteurs et sont reliés à des nœuds ZigBee. Les émetteurs S_i sont alimentés successivement par un générateur de bruit électrique.

Une vue générale du dispositif expérimental est montrée sur la FIGURE 4.17 et un exemple des signaux reçus et reconstitués au niveau de la station de base est montré sur la FIGURE 4.18. Sur cette figure, des signaux d'une durée de 60 ms sont représentés.

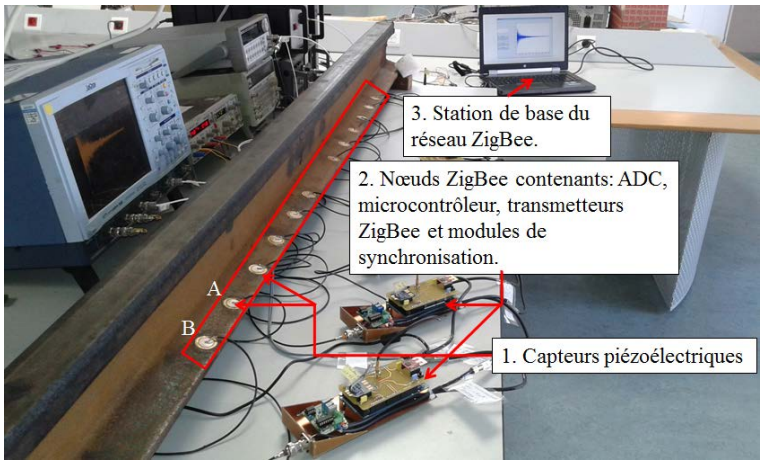


FIGURE 4.17 – Photos montrant une vue générale du dispositif expérimental.

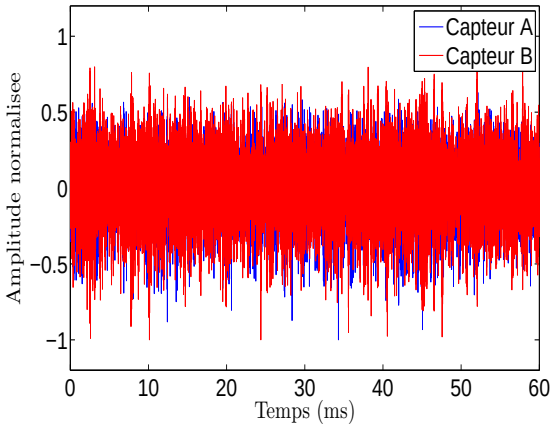


FIGURE 4.18 – Signaux typiques reconstitués au niveau de la station de base. Ils correspondent aux réponses mesurées par les transducteurs aux points A et B quand un transducteur S_i est excité par un générateur de bruit.

Résultats obtenus, comparaison et commentaires :

De la même manière que dans le chapitre deux, nous avons créé un changement local pour simuler la présence d'un défaut : une pression locale est appliquée sur le patin du rail à l'aide d'une pince étau. Ce défaut est placé à une distance d = 6 cm du point de mesure B.

La différence des formes d'onde (différence avec l'état de référence) est appliquée aux signaux reconstruits au niveau de la station de base. Ainsi, des mesures d'inter-corrélation de bruit sont effectuées dans un premier temps sans défaut. Les signaux obtenus constituent les formes d'onde de référence $\widetilde{R}_{AB}^{\text{ref}}(t)$. Ensuite, les mêmes mesures sont réalisées en présence de défaut et les formes d'onde obtenues sont notées $\widetilde{R}_{AB}^{\text{def}}(t)$. Par la suite, nous avons retiré le défaut et réalisé les mêmes mesures et les formes d'onde obtenues sont notées $\widetilde{R}_{AB}^{\text{free}}(t)$. Les corrélations obtenues pour ces trois scénarios de mesure sont montrés dans la FIGURE 4.19

(des signaux d'une durée de 1 ms sont présentés).

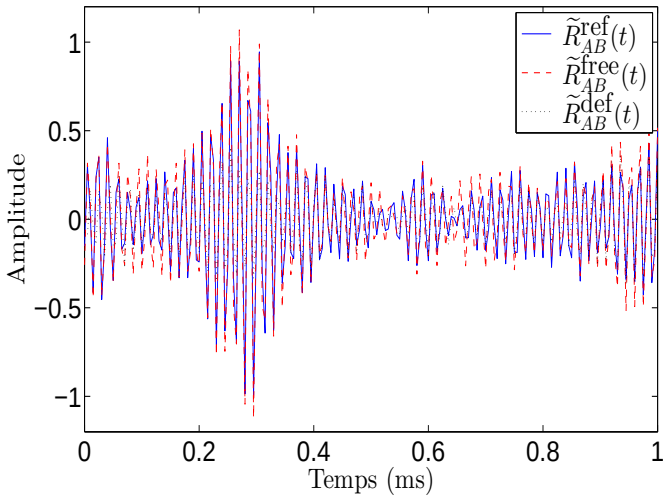


FIGURE 4.19 – Corrélations de bruits mesurées pour les trois situations : référence $\widetilde{R}_{AB}^{\text{ref}}(t)$, en présence de défaut $\widetilde{R}_{AB}^{\text{def}}(t)$ et en retirant le défaut $\widetilde{R}_{AB}^{\text{free}}(t)$.

Afin de mettre en évidence la signature du défaut, les formes d'onde de référence sont soustraites de celles obtenues en présence de défaut, cela donne

$$\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}(t) = \widetilde{R}_{AB}^{\text{def}}(t) - \widetilde{R}_{AB}^{\text{ref}}(t), \tag{4.4}$$

la corrélation de bruit différentielle avec défaut. Les formes d'onde de référence sont soustraites de celles obtenues en retirant le défaut, cela donne

$$\Delta\widetilde{R}_{AB}^{free}(t) = \widetilde{R}_{AB}^{\text{free}}(t) - \widetilde{R}_{AB}^{\text{ref}}(t), \tag{4.5}$$

la corrélation de bruit différentielle sans défaut. Les corrélations différentielles sont reportées dans la FIGURE 4.20.

Dans les figures (FIGURE 4.19 et FIGURE 4.20), les formes d'onde sont normalisées par rapport aux valeurs maximales de $\widetilde{R}_{AB}^{\text{ref}}$. Pour une meilleur visualisation, un zoom sur une partie des formes d'onde est présenté (1ms pour la FIGURE 4.19 et 2 ms pour les FIGURES 4.20).

Les FIGURES 4.20 représentent une comparaison entre la corrélation différentielle en présence de défaut $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}$ et la corrélation différentielle sans défaut $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{free}$. Le premier résultat (FIGURE 4.20.a) est obtenu avec le système filaire présenté dans le chapitre deux. Le deuxième résultat (FIGURE 4.20.b) est obtenu avec le système sans fil développé. En comparant ces deux figures, des similitudes entre les deux formes d'onde sont visibles pour les corrélations différentielles avec défaut $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}$. Toutefois, des différences sont également perceptibles, notamment au début du signal.

La comparaison entre $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}$ et $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{ref}$ met clairement en évidence la signature du défaut. La (FIGURE 4.20.b) prouve nettement que la réponse extraite des corrélations de bruit, appli-

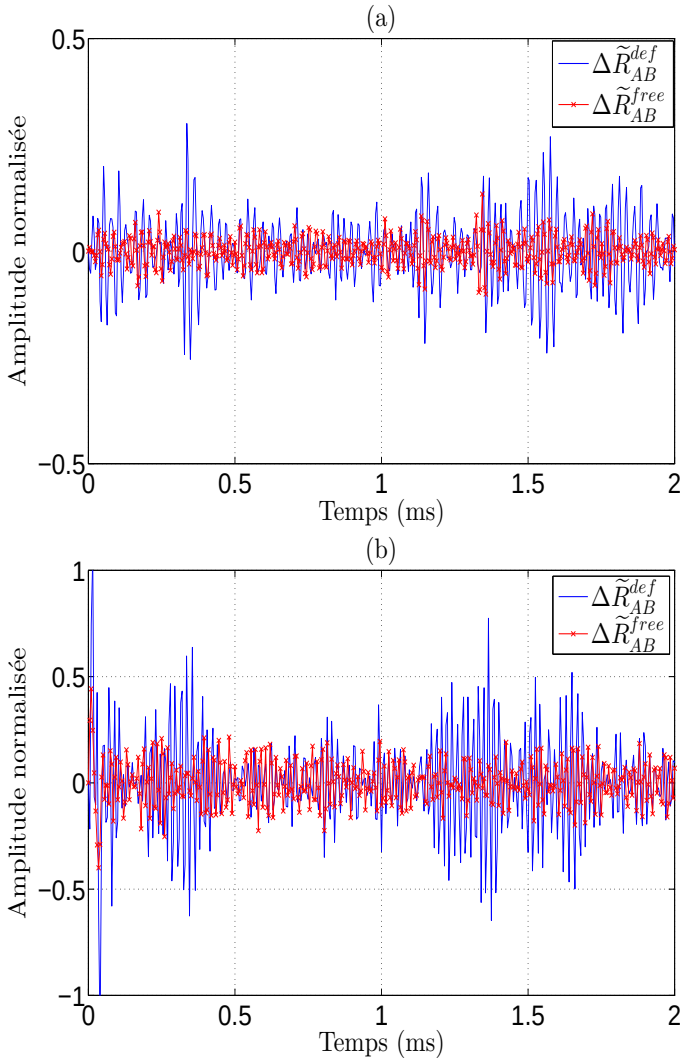


FIGURE 4.20 – Sensibilité à un éventuel défaut sur le rail. Corrélations différentielles sans défaut : $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{free}$ et avec défaut : $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}$. (a) résultats obtenus avec le système filaire (câble GPIB, système présenté au chapitre deux). (b) résultats obtenus avec le système sans fil.

quées sur les signaux reconstruits au niveau de la station de base, est sensible à un changement local dans le milieu. Toutefois, un niveau de bruit plus élevé comparé à la (FIGURE 4.20.a) est perceptible, représenté par la corrélation différentielle sans défaut $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{free}$. Afin de quantifier le niveau du bruit dans les deux figures, on peut définir la quantité suivante

$$\alpha = 20 \times log(\frac{RMS(\Delta\widetilde{R}_{AB}^{free})}{RMS(\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def})}), \tag{4.6}$$

où RMS [1] représente la moyenne quadratique, définie par $RMS = lim_{T\to\infty}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [f(t)]^2 dt}$.

1. Root Mean Square

La quantité définie par l'équation 4.6, notée α nous renseigne sur le niveau de bruit dans les FIGURES 4.20. Ainsi, nous pouvons avoir une indication sur la capacité de détection de notre système. Nous avons calculé cette quantité pour le cas des FIGURES 4.20 et nous avons obtenu $\alpha_{wired} = -7.5037$ [dB] pour le système filaire et $\alpha_{wireless} = -7.0310$ [dB] pour le système sans fil. Les deux résultats sont proches. En effet, le niveau de bruit peux être justifié par le fait que la reconstruction de la réponse active par l'approche corrélation de bruit repose sur tous les paquets d'ondes réverbérés ce qui génère des différences dues aux résidus de corrélations, changement des conditions d'expérience (température, humidité, ...). Ce point a été traité dans le chapitre deux section. 2.5 où nous avons proposé une expérience qui est basée sur plusieurs acquisitions avec de multiples distances défaut-transducteur pour extraire des informations cohérentes liées à la position du défaut. Cette expérience nous a permis de distinguer un défaut local d'un changement dans les conditions de frontière de l'échantillon de rail et/ou une variation matérielle globale induite par des changements de température ou autres effets.

Il faut noter qu'avec le prototype-plateforme de communication développé actuellement des imperfections de synchronisation lors du prélèvement des signaux s'ajoutent. Ce qui explique un niveau de bruit plus élevé dans la FIGURE 4.20.a comparée à la FIGURE 4.20.b. Sur cette dernière figure le signal $\Delta\widetilde{R}_{AB}^{def}$ représente donc la signature du défaut mélangée aux imperfections de synchronisation, erreurs dues au changements des conditions d'expérience (température, humidité, etc.) et résidus de corrélations.

4.6 Les limites du système développé et perspectives d'évolution du prototype

D'après les résultats des tests de validation de la nouvelle plateforme WSN développée, on peut conclure qu'il y a trois principaux aspects qui doivent être considérés à court terme pour améliorer les performances du système :

Le premier aspect concerne l'amélioration des capacités de l'ADC. Dans ce premier prototype l'échantillonnage des signaux se fait avec une résolution de 12 bits. Cette résolution permet de détecter des signaux de l'ordre de 0.805 mv. Afin d'améliorer la précision du système, on peut utiliser un ADC d'une résolution entre 16 et 24 bits. De plus, dans ce premier prototype, le procédé de multiplexage des signaux acquis n'a pas été utilisé car nous avons considéré qu'un seul capteur par nœud. Dans une perspective d'intégration d'autres capteurs, il serait intéressant d'exploiter ce procédé.

Le deuxième aspect est l'amélioration du processus de conditionnement de signal. Dans le prototype développé, des transducteurs de mêmes caractéristiques sont considérés pour la détection des signaux (ondes guidées) se propageant dans le milieu. Toutefois, les signaux reçus provenant de deux nœuds capteurs distincts présentent quelques différences notamment en ce qui concerne les amplitudes.

Le troisième aspect à considérer est la minimisation des temps de transmission des données

des nœuds capteurs vers la station de base. Nous avons constaté que l'inconvénient principal de la solution développée se situe au niveau des durées nécessaires pour la transmission des données entre capteurs-station de base. Dans ce premier prototype, la manière dont les données sont gérées nécessite des périodes de transmission prolongées, ce qui représenterait une contrainte sérieuse dans le cadre d'une application industrielle. Dans ce contexte, les techniques de compression de données peuvent être utilisées pour réduire la quantité de données à envoyer et ainsi réduire la consommation d'énergie pendant les communications sans fil. La compression des données est donc un aspect crucial des réseaux de capteurs sans fil. Au cours des deux dernières décennies, les techniques de compression des données ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches et des avancées significatives ont été réalisées. Xu et al. [132] ont étudié l'applicabilité des techniques de compression basées sur les transformées en ondelettes pour surmonter les limitations de bande passante des capteurs sans fil. Lynch et al. [133] ont utilisé le codage de Huffman pour réduire la taille des paquets de données à transmettre. Récemment, une nouvelle méthode de compression de données appelé échantillonnage compressé (Compressive Sensing : CS) a été introduite [134, 135, 136].

4.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'assembler les éléments développés dans les chapitres précédents pour montrer la faisabilité d'un démonstrateur de CSI sans fil basé sur une technologie de communication sans fil basse consommation. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressé à une contrainte importante des WSNs qui est spécifique à l'application CSI des structures. Il s'agit d'assurer une synchronisation des capteurs entre eux lors du prélèvement du signal. Après une revue des solutions proposées dans la littérature, nous avons opté pour une solution souple basée sur le standard IEEE 802.15.4 et qui répond aux besoins de notre application.

Par la suite, nous avons présenté le prototype-plateforme de communication sans fil pour les WSNs développé au cours de ces travaux et décrit les différents éléments le composant. Nous avons présenté et décrit les algorithmes de communication et de gestion réseau. Dans une perspective d'utilisation de la plateforme pour la surveillance et le contrôle-santé des structures ferroviaires, nous avons testé et validé le fonctionnement de notre système en déployant un réseau de 3 nœuds sur un rail de 2 m de longueur au laboratoire.

Ces résultats sont prometteurs et notre prototype peut être déployé dans le cadre de surveillance d'une zone critique comme les aiguillages, pont ou embarqué dans le train pour surveiller des zones ou pièces critiques du train. Le protocole de communication utilisé offre la possibilité de déployer un grand nombre de capteurs. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour le CSI. D'autres types de capteurs peuvent être intégrés à la plateforme tels que : les capteurs de température et d'humidité.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Les travaux de recherches menés au cours de cette thèse ont porté sur l'étude, la conception et le développement d'un système de Contrôle-Santé Intégré sans fil à détection passive. Les informations sur la structure sont extraites à partir des champs d'ondes complexes issus de la propagation des ondes élastiques guidées dans le milieu sous surveillance. Nous avons proposé un système de CSI basé sur la technologie de communication ZigBee. Celle-ci est adaptée aux réseaux de capteurs sans fil basse consommation, débit moyen et bas coût des entités du réseau afin de transférer des informations collectées par les capteurs vers la station de base. La méthode d'analyse des informations (signaux reconstruits au niveau de la station de base) est fondée sur la technique de corrélation de bruit présent dans la structure, qui permet de remonter à la fonction de Green élastique entre deux points de mesure.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté le contexte et rappelé des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, nous avons justifié le besoin des systèmes de CSI en termes de communication, efficacité énergétique, techniques de traitement de signal avancées. Nous avons présenté les apports des WSNs à travers plusieurs applications, notamment la surveillance de l'intégrité structurelle. Nous avons fait un état de l'art des techniques de contrôle non destructif utilisées dans l'industrie ferroviaire en soulignant leurs avantages et inconvénients. Ce qui nous a conduits vers l'engouement actuel pour les systèmes de contrôle-santé qui est : la transition vers des structures et infrastructures intelligentes (systèmes de contrôle fixes ou intégrés) ou des systèmes de contrôles embarqués dans des véhicules (systèmes mobiles ou embarqués). La nécessité d'obtenir des systèmes de contrôle temps-réel, souples, basse consommation d'énergie et non intrusifs, nous a conduits à privilégier l'approche de corrélation de bruits mesurés dans la structure par des transducteurs collés comme méthode d'inspection.

La technique de contrôle par corrélation de bruits acoustiques est déjà largement étudiée, notamment dans : les domaines ultrasonores, l'acoustique sous-marine et l'ingénierie civil. Pour les applications de contrôle santé intégré, plusieurs études théoriques et expérimentales ont montré le potentiel de cette technique originale. Cependant, dans le cas des applications de surveillance-santé des infrastructures ferroviaires par des transducteurs rigidement attachés à la structure en vibration, il n'existait pas, à notre connaissance, de modèle ni d'étude représentative sur l'application de l'approche CSI par corrélation de bruit pour la surveillance

des éléments de voie et/ou des véhicules ferroviaires. C'est pourquoi, dans le chapitre 2, nous avons proposé une étude de faisabilité de cette approche dans un contexte ferroviaire. Tout d'abord, nous avons présenté une relation théorique explicite entre les réponses actives expérimentales et une version post-traitée des fonctions de corrélation de bruit entre deux points de mesure. Ensuite, le degré de validité de cette relation a été testé expérimentalement sur un échantillon de rail. En effet, nous avons déterminé les conditions d'une reconstruction effective des réponses actives du rail par corrélation de bruit. Dans cette situation, le bruit ambiant est simulé par des transducteurs piézoélectriques collés sur le rail et alimentés successivement par un générateur de bruit électrique. Nous avons mis en évidence la sensibilité des fonctions de corrélations de bruit à un défaut local sur le rail. Par ailleurs, une meilleure caractérisation de la signature du défaut a été montrée en introduisant des informations spatio-temporelles par utilisation de plusieurs distances défaut-transducteur et la comparaison avec les courbes de dispersion numériques.

L'un des objectifs principaux de cette thèse était d'aboutir à un système de CSI où les capteurs pourraient transmettre leurs informations vers une station de traitement sur un canal sans fil. Les étapes de modélisations de la plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures ont été présentées dans le chapitre 3. Dans ces travaux, nous avons proposé une description détaillée de l'application d'un point de vue besoins, contraintes et propositions en tenant compte du cahier des charges. En effet, les acteurs intervenants dans la topologie du réseau ont été identifiés et leurs cas d'utilisation ont été décrits. Cette étape, nous a permis de mieux appréhender le fonctionnement global du système et de préparer l'étape suivante. Cette dernière a consisté à choisir la technologie de communication sans fil adéquate. Nous avons comparés différentes technologies potentiellement intéressantes pour notre application et la norme ZigBee a été retenue pour les transmissions capteurs-station de base. Dans une perspective de déploiement du système au sein d'un environnement ferroviaire, une connaissance précise de la propagation du signal radiofréquence dans ce milieu s'est avérée nécessaire. Cependant, nous avons réalisé une étude comparative sur la caractérisation d'une transmission ZigBee en termes d'atténuation et de portée. Ainsi, nous avons comparé et évalué les performances de notre système de communication en prenant en compte plusieurs scénarios d'étude. En parallèle, un démonstrateur a été réalisé afin de montrer la faisabilité du système globale. Ce démonstrateur est le fruit des études développés dans les chapitres deux et trois.

Lors du développement de ce démonstrateur, des contraintes liées aux réseaux de capteurs sans fil, spécifiques à l'application CSI ont été mises en exergue. Ces dernières consistaient à assurer la synchronisation des capteurs entre eux lors du prélèvement du signal. Autrement dit, les données prélevées par les capteurs doivent être datées avec précision. Après une étude comparative des procédés issus de la littérature, nous avons proposé et validé une solution basée sur le standard IEEE 802.15.4 qui répond aux besoins de notre application. Nous avons testé et validé le fonctionnement du démonstrateur CSI-ZigBee en déployant un réseau de trois nœuds. Les résultats obtenus avec le système sans fil ont montré une bonne adéquation avec ceux obtenus avec le système filaire.

Les travaux présentés dans cette thèse ont abouti à des résultats qui nous semblent prometteurs, d'une part, sur la possibilité d'extraire des informations importantes (apparition

d'un défaut) sur une structure en service, à partir d'un champ de bruit est d'un grand intérêt dans le domaine ciblé. Cette technique originale purement passive offre la possibilité d'utiliser le bruit présent naturellement dans le milieu et de se passer d'une source acoustique active. D'autre part, la suppression des liens filaires entre les capteurs et la station de traitement permet de réaliser des économies considérables lors du déploiement et de maintenance. De plus, les données provenant de capteurs de différentes natures (vibration, thermique, hydrométrique, etc...) peuvent être combinées. Ainsi, un système de surveillance-santé fixe ou embarqué est envisageable par implémentation d'un réseau de quelques capteurs placés ou intégrés à la structure.

Ces travaux ont été présentés dans des conférences internationales avec actes [137, 138, 139], conférence nationale avec acte [140] et deux publications soumises pour des revues internationales avec comité de lecture. Ces travaux ont également fait l'objet de plusieurs communications sans actes et obtenus un prix : prix du meilleur poster.

Perspectives

Intéressons-nous désormais aux voies d'améliorations et aux perspectives de recherches qui découlent des travaux présentés dans ce manuscrit. Les solutions proposées au cours de cette thèse sont certainement incomplètes et il reste de nombreuses questions en termes d'applicabilité du système dans un cadre industriel. À cours terme, il serait intéressant de continuer les expériences commencées au chapitre quatre en considérant plusieurs positions défaut-transducteurs et comparer les résultats obtenus à ceux présentés au chapitre 2 afin d'estimer les erreurs introduites par les imperfections du système sans fil (conditionnement de signal et erreur de synchronisation). Ainsi, la signature du défaut peut être séparée des imperfections lors du processus de synchronisation et des autres erreurs dues aux résidus de corrélations et des changements de températures, humidité, ... etc. Afin de ne pas endommager irréversiblement l'échantillon de rail, nous avons crée une contrainte locale dans le rail pour simuler la présence d'un défaut. Il serait dès lors intéressant, de voir le comportement de la fonction de corrélation de bruit en fonction des défauts réels (trous, fissure, cassure, ... etc.).

La deuxième orientation concerne l'étude de l'approche CSI par corrélation de bruit ambiant réel. Dans nos travaux, pour se rapprocher d'une situation réelle de bruit ambiant, ce dernier est simulé par des transducteurs piézoélectriques collés en plusieurs positions sur le rail et alimentés successivement par un générateur de bruit électrique. Afin d'aller plus loin sur l'intérêt pratique de cette approche, il serait également important d'étudier et de caractériser des sources de bruit naturelles (frottement, contact roue-rail, ... etc.) en regardant le contenu fréquentiel des signaux générés pour définir les processus de pré-traitements nécessaires pour les adapter à l'échelle des défauts recherchés.

Un autre point important mérite d'être étudié. Ce dernier concerne la recherche d'autres techniques pour s'affranchir des limites actuelles de la méthode différentielle, qui s'avère moins robuste sur le long terme. En effet, il est nécessaire d'avoir une base de données de référence afin de mettre en évidence l'effet d'un défaut par la méthode différentielle. Toutefois,

dans le cas qui nous intéresse (suivi de l'état d'intégrité structurel des rails), des phénomènes de vieillissement, qui ne constituent pas nécessairement un défaut (corrosion par exemple), peuvent se produire. Dans ce cas, des étalonnages périodiques des rails pour mettre à jour la base de données de référence sont nécessaires. Dans ce contexte, une technique alternative qui ne nécessite pas de comparaison avec la base de données de référence est d'un grand intérêt.

D'un point de vue communication sans fil et architecture réseau, pour des raisons de simplification, nous avons considéré une topologie étoile où les nœuds capteurs sont capables de transmettre leurs données vers un nœud central (coordinateur ZigBee) avec une communication mono-saut (à condition que tous les nœuds du réseau sont à portée du coordinateur). Il serait dès lors intéressant d'étendre le réseau vers une topologie maillée où les nœuds capteurs peuvent communiquer entre eux et participer au routage des informations jusqu'à la station de traitement. De plus, nous avons considéré une situation où les capteurs sont fixés sur le pied du rail. Ainsi, nous avons étudié le comportement de notre système dans un environnement ferroviaire. Il serait intéressant aussi d'étudier le comportement du système lorsqu'il est embarqué dans un véhicule mobile (train par exemple), afin de voir l'effet des cabines (présence des sièges, séparation entre cabines, différents matériaux ..., etc.), ainsi que l'effet de la mobilité sur le système de communication.

La dernière orientation concerne l'étude des algorithmes de compression des données afin de les intégrer dans le système. L'objectif de ces algorithmes sera de réduire la quantité de données envoyées sans fil et ainsi diminuer les temps de transmission. Ce dernier point à été évoqué dans le chapitre quatre.

Bibliographie

[1] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systèmes – Local and metropolitan area networks – Specific requirements –Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)., 2006. x, 65, 70

[2] V J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks, and A. Moulds. Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry : A Survey. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 16(3) :1088–1106, 2014. xiii, 29

[3] I.Siaud and all. Radio Convergence. *OMEGA, European Union Project Delivverable No ICT-213311, D2.5 v1.0*, October 2009. xiii, 84

[4] L.F.M.Camargo, E.Resendiz, J.Hart, J. Riley Edwards, N.Ahuja, and C.P.L.Barkan. Machine Vision Inspection of Railroad Track. Technical report, January 2011. 1, 22

[5] F.Marino, A.Distante, P.L.Mazzeo, and E.Stella. A Real-Time Visual Inspection System for Railway Maintenance : Automatic Hexagonal-Headed Bolts Detection. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews*, vol. 37, Issue. 3 :pp. 418–428, May 2007. 1, 22

[6] D.Inaudi and B.Glisic. Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing. *vol. 132 (1), Journal of Pressure Vessel Technology*, December 2009. 1, 22

[7] B.Rockstroh et all. Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axles. Seventeenth. World Conf. on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct, 25-28 2008. 1, 22

[8] J.Bouye. The Innovation and Modernization of Radiography in the Nuclear Industry. *The e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. 15(no. 11), Nov 2010. 1, 23

[9] C.Peng, X.Gao, L.Wang, Y.Zhang, J.Peng, and K.Yang. Ultrasonic Signal Multiplex Technology for Dynamic Wheelset Defect Detection System. vol. 1, pp. 260-262. Intl. Conf. on Information Technology, Computer Engeneering and Management Sciences(ICM), Sept, 24-25 2011. 1, 24

[10] H.Willems, B.Jaskolla, T.Sickinger, O.A.Barbian, and F.Niese. Advanced possibilities for corrosion inspection of gas pipelines using EMAT-technology. Tenth European Conf. on Non-Destructive Testing, ECNDT, June, 7-11 2010. 1, 24

[11] I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, and E.Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, vol. 38 :pp. 393–422, 2002. 3, 6, 7, 8, 17, 26

[12] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister. Next century challenges : Mobile networking for “smart dust”. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '99, pages 271–278, New York, NY, USA, 1999. ACM. 6, 11

[13] B. Atwood, B. Warneke, and K.S.J. Pister. Preliminary circuits for ssmart dust. pages 87–92. In IEEE SSMDS,, 2000. 6, 16

[14] V. Rocha and G. Goncalves. Sensing the world : Challenges on WSNs. volume 1, pages 54–59. Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on, May 2008. 8

[15] L.Wang and F.G.Yuan. Vibration Energy Harvesting by Magnetostrictive Material. *Smart Materials and Structures*, (17 :045009), 2008. 10

[16] W.K.G.Seah, Z.A.Eu, and H.P.Tan. Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP)-Survey and Challenges. pp. 1-5. In Proc. of the 1st Intl. Conf. on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory, Aerospace & Electronic Systems Technology, Wireless VITAE, 2009. 10

[17] T.Sainthuile, C.Delbarre, S.Grondel, and C.Paget. Vibrational Power Harvesting for Wireless PZT-based SHM Applications. pp. 679-684. 5th European workshop on structural health monitoring, 2010. 10

[18] P-L. Gatti and V. Ferrari. *Applied Structural and Mechanical Vibrations : Theory, methods and measuring instrumentation, 2^{nd}ed.* 2003. 13

[19] K. Akkaya and M. Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3 :325–349, 2005. 16

[20] Adnan Harb. Energy harvesting : State-of-the-art. *Renewable Energy*, 36(10) :2641 – 2654, 2011. Renewable Energy : Generation & Application. 16

[21] S.W. Arms, C.P. Townsend, D.L. Churchill, J.H. Galbreath, and S.W. Mundell. Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensors. In SPIE SSM, March 2005. 16

[22] J. Yick, B.Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Comput. Netw*, 52(12) :2292–2330, Aug 2008. 17

[23] E.P.K. Gilbert, B.Kaliaperumal, and E .B.Rajsingh. Research Issues in Wireless Sensor Network Applications : A Survey. *Information and Electronics Engineering*, vol. 2(5), September 2012. 18

[24] N.Alsharabi, L.R.Fa, F.Zing, and M.Ghurab. Wireless sensor networks of battlefields hotspot : challenges and solutions. pages pp. 192–196. 6th Intl. Symposium on Modeling and Optimisation in Mobile adhoc and Wireless Networks and Workshops., April 2008. 18

[25] R.Tan, G.Xing, J.Wang, and H.C.so. Collaborative target detection in wireless sensor networks with reactive mobility. pages pp. 150–159. sixteenth Intl. Workshop on Quality of Service, 2008. 18

[26] G. Simon, M. Maroti, A. Ledeczi, G. Balogh, B. Kusy, A. Nadas, G. Pap, J. Sallai, and K. Frampton. Sensor network-based countersniper system. in : Proceedings of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys), Baltimore, MD, 2004. 19

[27] D. Gay, P. Levis, and R.v. Behren. The nesC language : a holistic approach to networked embedded systems. in : Proceedings of the PLDI, San Diego, CA, 2003. 19

[28] G.Werner-allen, J.Johnson, M.Ruiz, J.Lees, and M.Welsh. Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network. in Proc. of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks, 2005. 19

[29] R. Jafari, A. Encarnacao, A. Zahoory, F. Dabiri, H. Noshadi, and M. Sarrafzadeh. Wireless sensor networks for health monitoring. In The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services, MobiQuitous 2005., pages 479–481. IEEE (2005). 19

[30] D. Trossen and D. Pavel. Sensor networks, wearable computing, and healthcare applications. *Pervasive Computing, IEEE 6(2), 58–61 (2007).* 20

[31] L. Xuemei, J. Liangzhong, and L. Jincheng. Home healthcare platform based on wireless sensor networks. pp. 263-266. in Proc. of the Fifth Intl. Conf. on Information Technology and application in Biomedicine, 2008. 20

[32] A.Milenkovic, C.Otto, and E.Jovanov. Wireless sensor networks for personal health monitoring : Issues and an implementation. *Computer communications*, vol. 29 : pp. 2521-2533, 2006. 20

[33] S.V.Srikanth, P.J.Pramod, K.P.Dileep, S.Tapas, M.U.Patel, and S.C.Babu. Design and implementation of a prototype Smart PARKing (SPARK) system using wireless sensor networks. Intl. Conf. on Advanced Information Networking and applications Workshop, pp.401-406, 2009. 20

[34] E.Hussain, G.Chow, V.C.M.Leung, R.D.McLeod, J.Misic, V.W.S.Wong, and O.Yang. Vehicular telematics over heterogeneous wireless networks : A survey. *Computer Communications*, vol. 33 :pp. 775–793, May 2010. 20

[35] H.M Tai, O.K.Tonguz, C.Saraydar, T.Talty, M.Ames, and A.MacDonald. Zigbee-based intra-car wireless sensor networks : a case study. *Wireless Communications*, vol. 14, Issue : 6 :pp. 67–77, December 2007. 21

[36] H.Lee, H.M.Tai, and O.K.Tonguz. On the security of intra-car wireless sensor networks. pp. 1-5. IEEE seventieth Vehicular Technology Conf, 2009. 21

[37] K.P.Shih, S.S.Wang, H.C.Chen, and P.H.Yang. CollECT : Collaborative Event detection and tracking in wireless heterogeneous sensor networks. *Computer Communications*, vol. 31 :pp. 3124–3126, September 2008. 21

[38] L.Zeni, A.Minardo, G.Porcaro, D.Giannetta, and R.Bernini. Monitoring railways with optical fibers. *SPIE Newsroom*, December 2013. 22

[39] A.Minardo, G.Porcaro, D.Giannetta, R.Bernini, and L.Zeni. Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors. *Journal of Applied Optics*, vol. 52, Issue. 16 :pp. 3770–3776, 2013. 22

[40] V.Uchanin, G.Lutcenko, A.Dshaganjan, and A.Nikonenko. Eddy Current Inspection of Steel Castings with Roughly Finished Surfaces. Tenth European Conf. on Non-Destructive Testing, ECNDT, Moscow, June, 7-11 2010. 22

[41] T.Heckel, H.M.Thomas, M.Kreutzbruck, and S.Rühe. High Speed Non-Destructive Rail Testing with Advanced Ultrasound and Eddy-Currentu Testing Techniques. Indian Natl.Seminar & Exibition on Non-Destructive Evaluation, NDE, Dec, 10-12 2009. 22

[42] Cofrend. Recommandation pour le contrôle des soudures par la mesure d'un courant alternatif 'Alterning Current Field Measurment' technique dite ACFM. Technical report, 2003. 23

[43] R.Grimberg, A.Savin, R.Steigmann, and C.Comisu. Gpr ? Electromagnetic Sensor Array Data Fusion. Tenth European Conf. on Non-Destructive Testing, ECNDT, Moscow, June, 7-11 2010. 23

[44] I.Al-Qadi, J.Rudy, J.Boyle, and E.Tutumluer. Railroad Ballast Fouling Detection Using Ground Penetrating Radar – A New Approach Based on Scattering from Voids. Ninth European Conf. on NDT, ECNDT, Berlin (Germany), Sept 2006. 23

[45] S.Starman and V.Matz. Automated System for Crack Detection Using Infrared Thermographic Testing. Fourth Intl. Conf. CANDU In-service Workshop and NDT, Toronto, Ontario (Canada), June, 18-21 2012. 23

[46] A.Elballouti, S.Belattar, and N.Laaidi. Nondestructive Thermal Characterization Of The Spherical Defects In The Roadways. Tenth European Conf. on Non-Destructive Testing, ECNDT, Moscow, June, 7-11 2010. 23

[47] W.Swiderski and V.Vavilov. IR thermographic detection of defects in multi-layered composite materials used in military applications. pp.553-556. Fifteenth Intl. Conf. on Terahertz Electronics, Sept, 2-9 2007. 23

[48] C.Alves Marinho, J.Rabello, M.Aiub De Mello, E.Iguchi, R.Lopes, D.Oliveira, A.Silva, L.Castro, L.Ferreira, S.Dos Santos, H.Milani, and N.Freitas. Computed radiography technique for weld inspection : the process of qualification and validation of inspection

procedures in Brazil. no. 8, vol. 15, The e-Journal of Nondestructive Testing, June 2010. 23

[49] R.Pincu, E.Dayan, and O.Kleinberger. Digital Radiography ? Cutting edge digital radiography technology in daily NDT use. Tenth European Conf. on Non-Destructive Testing, ECNDT, Moscow, June, 7-11 2010. 23

[50] R. da Costa Marques Pimentel et al. Hybrid fiber-optic/electrical measurement system for characterization of railway traffic and its effects on a short span bridge. *IEEE Sens*, 8(7) :1243–1249, Jul 2008. 26

[51] B. Ollier. Intelligent infrastructure-The business challenge : Railway Condition Monitoring. pages 1–6. in Proc. IET Int. Conf. Railway Condition Monitoring, Birmingham, U.K., 2006. 26

[52] J. Chen and C. Roberts. Effective condition monitoring of line side assets. pages 78–83. in IET Int. Conf. Railway Condition Monitoring, Birmingham, U.K, 2006j. 26

[53] C. O. Donnell et al. Pantograph damage and wear monitoring system. pages 178–181. in Proc. IET Int. Conf. Railway Condition Monitoring, Birmingham, U.K, 2006. 26

[54] C.Y. Chong and S. Kumar. Sensor networks : Evolution, opportunities, challenges. *Proc. IEEE*, 91(8) :1247–1256, Aug 2003. 26

[55] D. Estrin et al. Connecting the physical world with pervasive networks. *IEEE Pervasive Comput*, 1(1) :59–69, Mar 2002. 26

[56] S. Tilak et al. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Comput. Commun. Rev*, 6(2) :28–36, Apr 2002. 26

[57] K. Dierkx. The Smarter Railroad. Transport R&D for Innovation Project Report. Technical report, IBM Global Business Services, Armonk, NY, USA, 2009. 26

[58] R. Goodall and C. Roberts. Concepts and techniques for railway condition monitoring. pages 90–95. in IET Int. Conf. Railway Condition Monitoring, Birmingham, UK, 2006. 26

[59] D. Hall and J. Llinas. An introduction to multisensor data fusion. *Proc. IEEE*, 85 :6–23, Jan 1997. 26

[60] J. Han and M. Kamber. Data mining : Concepts and techniques. *in Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier,*, 2006. 26

[61] S. McConnell and D. Skillicorn. A distributed approach for prediction in sensor networks. pages 28–37. in Proc. 1st Int. Workshop Data Mining Sens. Netw.a, Newport Beach, CA, USA, 2005. 26

[62] V. Hodge. *Outlier and Anomaly Detection : A Survey of Outlier and Anomaly Detection Methods*. Saarbrucken, Germany : Academic, 2011. 26

[63] J. Lopez-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, and A. Cobo. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *J. Lightw. Technol*, 29(4) :587–608, Feb 2011. 26

[64] J. Rabatel, S. Bringay, and P. Poncelet. SOMAD : SensOr mining for anomaly detection in railway data. *Adv. Data Mining Appl. Theor. Aspects, LNCS*, 5633 :191–205, 2009. 27, 29

[65] M. Palo. Condition monitoring of railway vehicles : a study on wheel condition for heavy haul rolling stock. Master's thesis, Luleâ Univ. Technology, Luleâ, Sweden, 2012. 27, 29

[66] M. Grudén, A. Westman, J. Platbardis, P. Hallbjorner, and A. Rydberg. Reliability experiments for wireless sensor networks in train environment. pages 37–40. in Proc. Eur. Wireless Technol. Conf., 2009. 28, 29

[67] D. Barke and W. Chiu. Structural health monitoring in the railway industry : A review. *Struct. Health Monitoring*, 4(1) :81–93, Mar 2005. 29

[68] N. Hoult et al. Wireless sensor networks : Creating smart infrastructure. volume 162, pages 136–143. Proc. ICE-Civil Eng., Aug 2009. 29

[69] A. Kerrouche, W.J.O. Boyle, Y. Gebremichael, T. Sun, K.T.V. Grattan, B. TÃljsten, and A. Bennitz. Field tests of fibre Bragg grating sensors incorporated into for railway bridge strengthening condition monitoring. *Sensors and Actuators A : Physical*, 148(1) :68 – 74, 2008. 29

[70] M. Bocciolone, G. Bucca, A. Cigada, A. Collina, and L. Comolli. An application of FBG accelerometers for monitoring pantographs of underground trains. volume 7653, pages 765341–1 – 765341–4. Proc. SPIE, Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2010. 29

[71] P. Wolfs, S. Bleakley, S. T. Senini, and P. Thomas. An autonomous, low cost, distributed method for observing vehicle track interactions. pages 279–286. in Proc. IEEE/ASME Joint Rail Conf., Atlanta, GA, USA, 2006. 29

[72] J. Nuffer and T. Bein. Application of piezoelectric materials in transportation industry. pages 1–11, San Sebastian, Spain, 2006. in Proc. Global Symp. Innovative Solutions Advancement Transp. Ind. 29

[73] A. Anastasopoulos, K. Bollas, D. Papasalouros, and D. Kourousis. Acoustic emission on-line inspection of rail wheels. pages 1–8. in Proc. 29th Eur. Conf. Acoust. Emission Testing, Wien, Austria, 2010. 29

[74] C. Grosse et al. Wireless acoustic emission sensor networks for structural health monitoring in civil engineering. pages 1–8. in Proc. Eur. Conf. Non Destructive Testing, Berlin, Germany, 2006. 29

[75] J. Kim, K. S Lee, and J. Oh. A study on the wireless onboard monitoring system for railroad vehicle axle bearings using the SAW sensor. *Sens. Syst. Softw*, 57 :52–58, 2011. 29

[76] D. Barke and W. Chiu. Structural health monitoring in the railway industry : A review. *Struct. Health Monitoring*, 4(1) :81–93, 2005. 29

[77] E. Aw. *Low cost monitoring system to diagnose problematic rail bed : case study of mud pumping site*. PhD thesis, Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, USA, 2007. 29

[78] J. Rabatel, S. Bringay, and P. Poncelet. Anomaly detection in monitoring sensor data for preventive maintenance. *Exp. Syst. Appl*, 38(6) :7003–7015, Jun 2011. 29

[79] J. Reason and R. Crepaldi. Ambient intelligence for freight railroads. *IBM J. Res. Develop*, 53(3) :1–14, May 2009. 29

[80] P. Kolakowski et al. Structural health monitoring of a railway truss bridge using vibration-based and ultrasonic methods. *Smart Mater. Struct*, 20(3) :035016, Mar 2011. 29

[81] A. Lorestani, S. A. Mousavi, and R. Ebadaty. Monitoring rail traffic usingWireless Sensor Network (WSN). *IJCSET*, 2(6) :1280–1282, Jun 2012. 30

[82] A. Matsumoto et al. Continuous observation of wheel/rail contact forces in curved track and theoretical considerations. *Veh. Syst. Dyn*, 50 :349–364, 2012. 30

[83] M. Krüger et al. Sustainable Bridges. Technical Report on Wireless Sensor Networks using MEMS for Acoustic Emission Analysis including other Monitoring Tasks. Technical report, Stuttgart, Germany : European Union, 2007. 30

[84] C. Bell. Event monitoring comes of age : predict and prevent as well as find and fix. pages 44–47. in Proc. IET Int. Conf. Railway Condition Monitoring, Birmingham, U.K, 2006. 30

[85] S. Zoller et al. Efficient real-time monitoring of multimodal transports with wireless sensor networks. In Proc of 36th IEEE Conf. Local Comput. Netw., Bonn, Germany, 2011. 30

[86] S. Bruni, R. Goodall, T. Mei, and H. Tsunashima. Control and monitoring for railway vehicle dynamics. *Veh. Syst. Dyn*, 45(7/8) :743–779, 2007. 31

[87] R. W. Ngigi, C. Pislaru, A. Ball, and F. Gu. Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics. *Journal of Physics : Conference Series*, 364(1), Jan 2012. 31

[88] C. Ward et al. Condition monitoring opportunities using vehicle-based sensors. volume 225, pages 202–218. Proc. Inst. Mech. Eng. Part F, J. of Rail Rapid Transit, 2011. 31

[89] E. Moulin, N. Abou Leyla, J. Assad, and S. Grondel. Applicability of acoustic noise correlation for structural health monitoring in nondiffuse field conditions. *Appl. Phys Lett. 95, 094104*, 2009. 31, 35

[90] N. Abou Leyla, E. Moulin, and J. Assaad. Influence of a localized defect on acoustic field correlation in a reverberant medium. *J. Appl. Phys*, 110(8) : 084906, 2011. 31

[91] S. Djili, E. Moulin, J. Assaad, F. Boubenider, and F. Benmeddour. Contrôle passif des tubes par intercorrélation de champ acoustique ambiant. pages 17–21, Aïn el Turk, Oran, Algérie, 26-28 Novembre 2012. $3^{ème}$ Conférence internationale sur le soudage, le CND et l'industrie des matériaux et alliages, IC-WNDT-MI'12. 31

[92] H. Achdjian. *Propriétés de moyennage d'ensemble des signaux acoustiques en milieu réverbérant et applications potentielles au contrôle et à la caractérisation des structures.* Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), 2014. 31

[93] L. Chehami. *Surveillance passive des milieux réverbérants par corrélation de bruit ambiant : application à la localisation de défauts.* Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), 2015. 31

[94] E.Larose, O.I.Lobkis, and L.Weaver. Passive correlation imaging of a buried scatterer (L). *J. Acoust. Soc. Am. 119 (6)*, 2006. 35

[95] K.G.Sabra, E.S.Winkel, D.A.Bourgoyne, B.R.Elbing, S.L.Ceccio, M.Perlin, and D.R.Dowling. Using cross correlations of turbulent flow-induced ambient vibration to estimate the structural impulse response. Application to structural health monitoring. *J. Acoust. Soc. Am. 121 (4)*, 2007. 35

[96] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. Bou Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad. Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation. *Journal of Applied Physics 115, 104901 (2014).* 35, 37, 38

[97] O.I.Lobkis and R.L.Weaver. On the emergence of the Green's function in the correlations of diffuse field. *J.Acoust. Soc. Am*, vol. 110 :pp. 3011–3017, 2001. 35, 37

[98] J.Rickett and J.Claerbout. Acoustic daylight imaging via spectral factorization : Helioseismology and reservoir monitoring. *The Leading Edge*, vol. 18 :pp. 957–960, 1999. 37

[99] K.G.Sabra, P.Roux, and W.A.Kuperman. Emergence rate of the time domain Green's function from the Ambient noise cross-correlation function. *J.Acoust. Soc. Am*, vol. 118 :3524–3531, 2005. 37, 38

[100] T.Nagayama, M.Abe, Y.Fujino, and K.Ikeda. Structural Identification of a Nonproportionally Damped System and its Application to a Full-Scale Suspension Bridge. *Struct. Eng.*, vol. 131 :pp. 1536–1545, 2005. 37

[101] R.Snieder and E.Safak. Extracting the building response using seismic interferometry ; theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California. *Bull. Seismol. Soc. Am*, vol. 96 :pp. 586–598, 2006. 37

[102] C. Draeger, J-C. Aime, and M. Fink. One-channel time-reversal in chaotic cavities : Experimental results. *J. Acout. Soc. Am*, 105(2) :618–625, 1999. 47

[103] F. Benmeddour, F. Treyssède, and L. Laguerre. Numerical modeling of guided wave interaction with non-axisymmetric cracks in elastic cylinders. *International Journal of Solids and Structures*, 48 :764–774, 2011. 53

[104] Jinyun Zhang, P.V. Orlik, Z. Sahinoglu, A.F. Molisch, and P. Kinney. Uwb systems for wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 97(2) :313–331, Feb 2009. 66

[105] J.C. Haartsen. The bluetooth radio system. *Personal Communications, IEEE*, 7(1) :28–36, Feb 2000. 66

[106] Jan Beutel, Oliver Kasten, Friedemann Mattern, Kay Römer, Frank Siegemund, and Lothar Thiele. Prototyping wireless sensor network applications with btnodes. In Holger Karl, Adam Wolisz, and Andreas Willig, editors, *Wireless Sensor Networks*, volume 2920 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 323–338. Springer Berlin Heidelberg, 2004. 66

[107] H.T.Friis. A note on a simple transmission formula. 34(3) :254–256, May 1946. 72

[108] T. S. Rappaport. *Wireless communications principles and practice*. 1996. 73

[109] ITU. Propagation data and prediction methods for the planing of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 mhz to 100 ghz, 02 2012. 73

[110] J. M. Keenan and A. J. Motley. Radio coverage in buildings. 1990. 74

[111] Digi International. Xbee/xbee-pro zb rf modules. Technical report. 74

[112] Arduino. Arduino website, 2014. 74

[113] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani. Clock synchronization for wireless sensor networks : a survey. *Journal Ad Hoc Networks, Vol. 3, pp. 281-323, 2005*. 91

[114] D. L. Mills. Network Time Protocol, Version 3 : Specification, Implementation and Analysis, Network Working Group, University of Delaware, 1992. 91

[115] D. L. Mills. Internet time synchronization : the network time protocol. *IEEE transactions on communications, Vol. 39, no. 10, pp. 1482–1493, 1991*. 91

[116] IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systèmes / IEEE, New York, 2002. 91

[117] H. Cho, J. Jung, B. Cho, Y. Jin, S.W. Lee, and Y. Baek. Precision time synchronization using IEEE 1588 for wireless sensor networks. International Conference on Computational Science and Engineering, Vol. 2, pp. 579-586, 2009. 91, 93

[118] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts. Proc. Fifth Symp. Operating Systèmes Design and Implementation (OSDI '02), Vol. 36, pp. 147 – 163, 2002. 91, 93

[119] A. Hu and S.D. Servetto. Algorithmic aspects of the time synchronization problem in large-scale sensor networks. *Journal. Mobile Networks and Applications, special issue on wireless sensor networks, Vol. 10, Issue. 4, pp. 491 – 503, 2005.* 91, 93

[120] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi. The flooding time synchronization protocol. Second ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04), pp. 39-49, 2004. 91, 93

[121] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and Á. Lédeczi. Robust multi-hop time synchronization in sensor networks. International Conference on Wireless Networks, pp. 454-460, 2004. 91

[122] K.-L. Noh, E. Serpedin, and K. Qaraqe. A new approach for time synchronization in wireless sensor networks : Pairwise Broadcast Synchronization. *IEEE Transaction on Wireless Communication, Vol. 7, no. 9, pp. 3318-3322, 2008.* 91, 93

[123] A.R. Swain and R.C. Hansdah. An energy efficient and fault-tolerant clock synchronization protocol for wireless sensor networks. 2nd International Conference on COMSNETS, pp. 1-10, 2010. 92

[124] J. Elson and D. Estrin. Time synchronization for wireless sensor networks. In Proc. of 15th Intl Conf. on Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS-01), pp. 1965-1970, 2000. 92

[125] Z. Tian, X. Luo, and G.B. Giannakis. Cross-layer sensor network synchronization. Conference Record of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Vol. 1, pp. 1276 – 1280, 2004. 92

[126] D. Macii, A. Ageev, and A. Somov. Power consumption reduction in wireless sensor networks through optimal synchronization. Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) '09. IEEE, pp. 1346-1351, 2009. 92

[127] S. H. Lee and L. Choi. Chaining clock synchronization : an energy-efficient clock synchronization scheme for wireless sensor networks. 10th International Symposium on Pervasive Systèmes, Algorithms, and Networks, pp. 172-177, 2009. 92

[128] K.-L. Noh, Q. Chaudhari, E. Serpedin, and B. Sutert. Power-efficient clock synchronization using tow-way timing message exchange in wireless sensor networks. Military Communications Conference (MILCOM), pp. 1-7, 2006. 92

[129] Y. Sun, J. Qian, and J. Wu. Hybrid energy-aware time synchronization protocol for WSNs in coal mine. Intl. Conf. on Information Acquisition, pp. 436-441, 2007. 92

[130] H. Kopetz and W. Ochsenreiter. Clock synchronization in distributed real-time systems. *IEEE Trans. Comput.*, 36(8) :933–940, August 1987. 95

[131] D.C. Jefferson, S.M. Litchen, and L.E. Young. A test of prprecision GPS clock synchronizationa. pages 1206 – 1210. In Proc of he 1996 IEEE Intl 50th Frequency Symposium., Jun 1996. 96

[132] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Kant Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. A wireless sensor network for structural monitoring. In *Proceedings of the 2Nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '04, pages 13–24, New York, NY, USA, 2004. ACM. 116

[133] JP. Lynch, AS. Kiremidjian A. Sundararajan, KH. Law, and E. Carryer. Power-efficient data management for a wireless structural monitoring system. In *the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 15–17 September 2003,*, page 1177–1184., 2003. 116

[134] Donoho D. Compressed sensing. *IEEE Trans Inform Theory*, 52(4) :1289–1306., 2006. 116

[135] Baraniuk R. A lecture on compressive sensing. *IEEE Signal Process Mag 2007*, 24(4) :118–121., 2007. 116

[136] Nur Sila Gulgec, S. Golnaz Shahidi, and Shamim N. Pakzad. *A Comparative Study of Compressive Sensing Approaches for a Structural Damage Diagnosis*, chapter 163, pages 1910–1919. 2016. 116

[137] **L.Sadoudi**, U.Biaou, M.Bocquet, E.Moulin, A.Rivenq, and J.Assaad. Experimental characterisation of IEEE 802.15.4 channel running at 2.4 GHz inside buildings. In *Measurements Networking (M N), 2015 IEEE International Workshop on*, pages 1–6, Oct 2015. 119

[138] U.Biaou, **L.Sadoudi**, M.Bocquet, and A.Rivenq. Modeling of ZigBee (IEEE 802.15.4) channel in rail environment for Intelligent Transport. In *Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2015 4th International Conference on*, pages 293–298, May 2015. 119

[139] J.Assaad, F.Benmeddour, E.Moulin, H.Achdjian, L.Chehami, **L.Sadoudi**, M.Bocquet, J.De Rosny, C.Prada, and S.Djili. Exploitation de la propagation réverbérante des ondes élastiques dans les structures : vers un concept de réseau de capteurs SHM à basse consommation. In Proc of 4^{th} IC-WNDT-MI, Annaba, Algeria., November 9-11, 2014. 119

[140] **L.Sadoudi**, M.Bocquet, E.Moulin, Y.Elhillali, F.Benmeddour, and J.Assaad. Contribution au développement d'un réseau sans fil pour le contrôle santé intégré (CSI) des structures. In $17^{èmes}$ *Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-Nanoélectronique, JNRDM 2014*, page 4 pages, Villeneuve d'Asq, 2014. 119

Résumé

Le Contrôle-Santé Intégré (CSI) réduit les besoins d'inspections humaines grâce à une surveillance automatisée, réduit les coûts de maintenance grâce à la détection précoce des anomalies avant qu'elles ne dégénèrent et améliore la sécurité ainsi que la fiabilité des services. L'objectif de cette thèse est de concevoir une plateforme de communication sans fil pour le CSI des structures ferroviaires. Le principe de contrôle repose sur la reconstruction des réponses impulsionnelles (fonctions de Green) par corrélation de bruit aléatoire se propageant dans le milieu. Durant ces travaux, nous avons éprouvé expérimentalement la relation entre les réponses actives expérimentales et une version post-traitée des fonctions de corrélation de bruit dans un contexte ferroviaire. Ainsi, nous avons démontré l'applicabilité des fonctions de corrélation pour la détection d'un défaut local sur un rail. Ensuite, nous avons réalisé une étude expérimentale comparative sur la caractérisation d'une transmission ZigBee en termes d'atténuation et de portée dans plusieurs environnements. Dans l'environnement ferroviaire sous test, nous avons démontré l'adéquation avec la portée d'une transmission ZigBee mono-saut (dans un rayon de 76m). Une solution de synchronisation des capteurs lors du prélèvement du signal basée sur la norme IEEE 802.15.4 a été proposée et validée par une campagne de mesures. Il a été démontré que cette approche offre une précision de l'ordre de quelques centaines de nanosecondes. Un prototype-plateforme de communication sans fil basé sur la technologie ZigBee/IEEE 802.15.4 a été mis en place et déployé sur un échantillon de rail. Cette solution a permis de valider les performances de cette plateforme, une fois les données récoltées par les transducteurs, ces informations sont transmises par un lien ZigBee vers une station de base où des algorithmes de détection leurs sont appliqués.

Mots clés : Corrélation de bruit, fonctions de Green, réverbération, réseau de capteurs sans fil, ZigBee, contrôle-santé des rails, détection de défaut.

Abstract

Structural Health Monitoring (SHM) reduces human inspection requirements through automated monitoring, reduces maintenance costs by early detection of defects before they escalate, and improves safety and reliability of services. The work presented in this thesis aims to design a wireless communication platform for railway structures health monitoring. The control principle is based on the reconstruction of impulse responses (Green's functions) by correlation of random noise propagated in the medium. In this work, direct comparison between an active emission-reception response and the estimated noise correlation function has confirmed the validity of the equivalence relation between them. Thus, we have demonstrated the applicability of the correlation functions for local defect detection in a rail. Then, we conducted an experimental study on the characterization of a ZigBee transmission in terms of path loss and communication range in multiple environments. In the railway environment under test, we showed the adequacy with the range of a ZigBee single-hop transmission (within a radius of 76m). Furthermore, a flexible solution for sensors synchronization during the sampling process, based on IEEE 802.15.4 standard was proposed and validated by a measurement campaign. It has been demonstrated that this approach provides a precision of a few hundred nanoseconds. A wireless communication-platform prototype based on the ZigBee/IEEE 802.15.4 technology has been implemented and deployed on a rail sample. This solution enabled the validation of the platform performances, once the data collected by the transducers, the information is transmitted by a ZigBee link to a base station where detection algorithms are applied.

Keywords : Noise correlation, Green's functions, reverberation, wireless sensor network, ZigBee, rail health monitoring, defect detection.